
Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidfördersystem

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Peter Lotz

geboren am 6. Juli 1977
in Mainz

Referent: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Wallrabe

Tag der Einreichung: 5. Oktober 2009
Tag der mündlichen Prüfung: 30. November 2009

D 17
Darmstadt 2010

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-20058

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2005/>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints, E-Publishing-Service der TU-Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.0 Deutschland



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>

Zusammenfassung

Dielektrische Elastomeraktoren sind eine Klasse von elektroaktiven Polymeren, die seit ca. 10 Jahren intensiv erforscht werden. Diese Aktoren beruhen auf dem elektrostatischen Prinzip der Anziehung entgegengesetzter Ladungen. Aufgrund ihres geringen Gewichtes, der hohen Flexibilität und großen Auslenkung wird diesen Festkörperaktoren ein hohes Potenzial zugeschrieben, in den kommenden Jahren konventionelle Aktortechnologien zu ersetzen.

Die Technologie der dielektrischen Elastomeraktoren wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um eine peristaltische Pumpe zu entwickeln. Bei der peristaltischen Fluidförderung wird das Bewegungsmuster biologischer Hohlgorgane nachgeahmt. Die periodische Kontraktion und Relaxation der Muskeln dieser Organe führt dazu, dass Medien durch das Organ hindurch bewegt werden. Technische Umsetzungen dieses für biologische Flüssigkeiten schonenden Pumpprinzips gibt es bisher nur in Form von Schlauchpumpen. Bei diesen Geräten steht einem kleinen Schlauchdurchmesser eine unverhältnismäßig große Antriebsmechanik gegenüber.

Für die technologische Realisierung der in den peristaltischen Pumpenkörper integrierten Aktorelemente sind umfangreiche Prozesscharakterisierungen und -optimierungen notwendig. Dieser Thematik ist der erste Schwerpunkt gewidmet. Ausgehend vom Stand der Technik der Materialien und Prozessierung von Dielektrikum und Elektrode werden Möglichkeiten zur Reduzierung der Betriebsspannung untersucht. Es wird gezeigt, dass durch das Einbringen von anorganischen Partikeln mit hoher Dielektrizitätszahl eine Verdoppelung der Leistungsfähigkeit der Aktoren zu erwarten ist. Mit Hilfe eines Modells aus konzentrierten Bauelementen wird erklärt, wie der Schichtwiderstand der Elektroden Betriebsparameter wie z. B. die maximale Arbeitsfrequenz beeinflusst. Zur Charakterisierung der Aktoren werden spezielle Messplätze entwickelt. Um die gewonnen Messdaten verifizieren und erklären zu können wird ein elektrisch-mechanisches Modell dielektrischer Elastomerstapelaktoren entwickelt. Das mechanische Verhalten wird in diesem Modell mit Hilfe eines modifizierten Festkörpermodells beschrieben. Durch die Kombination des elektrischen und mechanischen Modells kann die dynamische Auslenkung der Aktoren über einen großen Frequenzbereich beschrieben werden.

Im zweiten Teil wird die peristaltische Fluidförderung betrachtet. Es wird dargestellt, in welcher Form wichtige Parameter wie Wellenlänge, Amplitude und geometrische Abmessungen die Förderleistung beeinflussen. Es werden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, wie aus dielektrischen Elastomeraktoren Fluidfördersysteme aufgebaut werden können. Mit Ergebnissen numerischer Simulationen werden die Möglichkeiten und Grenzen dieser Fluidsysteme aufgezeigt und es werden Designparameter für die Aktorik der peristaltischen Pumpe definiert.

Der dritte Teil der Arbeit widmet sich der Realisierung des Fluidfördersystems. Anhand der im zweiten Teil definierten Parameter wird eine Variante der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomeraktoren entwickelt und realisiert. Hierbei wird sowohl auf die Besonderheiten der Fertigung als auch auf die messtechnische Charakterisierung der Elastomeraktoren und der Pumpe eingegangen. Die Fertigung zeichnet sich dadurch aus, dass der gesamte Pumpenkörper mit integrierten Aktorelementen und innenliegendem Kanal in einem durchgehenden Prozess vollautomatisiert hergestellt wird. Die Charakterisierung zeigt die Leistungsfähigkeit der Aktortechnologie und die fluidischen Kennwerte der Pumpe. Die Messungen an mehreren Pumpenexemplaren ergeben eine maximale Förderleistung von bis zu 11 $\mu\text{l}/\text{min}$. Damit zeigt diese Arbeit erstmalig, wie die Vorzüge dielektrischer Elastomerstapelaktoren für fluidische Anwendungen genutzt werden können.



Abstract

Dielectric elastomer actuators are a class of electroactive polymers which have been developed for about ten years. Their functional principle is based on the forces between opposite charges. These actuators appeal due to their lightness, flexibility and large displacements. It is in their capacity to replace conventional actuator technologies over the next few years.

Within the scope of this thesis the technology of dielectric elastomer actuators is used to realize a peristaltic pump. A peristaltic pump adopts the motion pattern of a biological hollow organ. Here, periodic contractions and relaxations of the organs' muscles move a medium through the organ. As these movements have a very low impact on the sensitive cell membranes, the peristaltic fluid delivery is extremely gentle to biological fluids. Until now, the only technical implementation of the peristaltic principle has been found in hose pumps. A drawback of these pumps is the relationship between their hose diameter and their relatively large driving mechanism.

To realise the actuator elements which are integrated into the peristaltic pump body, extensive process characterisations are necessary. This is the topic of the first part of the thesis. The technology of dielectric elastomer actuators is described in detail. Based on the state-of-the-art of materials and processing of dielectric and electrodes, possibilities to reduce the driving voltage are investigated. The results show that compounds of dielectric polymers and anorganic particles can nearly double the performance of dielectric elastomer actuators. The requirements on the electrodes are defined by using a lumped electrical model. With the help of this model it can be demonstrated how the sheet resistance influences operating parameters, e. g. the maximum driving frequency. Several dedicated measurement setups are developed to characterize the actuator elements. To verify the measurement data an electrical-mechanical model of dielectric elastomer stack actuators is developed. Within this model a modified solid-body-model is used to describe the mechanical behavior of the actuators. Combining the electrical and mechanical model the dynamic deformation of the actuators can be described over a broad frequency range.

The second part describes the peristaltic fluid delivery. It is shown how important parameters such as wavelength, amplitude and geometric size influence the flow rate of the pump. Two ways are identified for the development of a peristaltic pump from dielectric elastomer actuators. The results of a numeric simulation outline the possibilities and limits of such fluidic systems. Furthermore, the results are used to define design parameters of actuator elements of the peristaltic pump.

The third part describes the realisation of the peristaltic fluid system itself. With the help of the parameters defined in the second part of the thesis, a version of the peristaltic pump is developed and realized. Here, the particularities of its fabrication and electromechanical characterization are taken into consideration. One particular feature of the automated fabrication is that the pump is build in one single process in which all the actuator elements and the fluidic channel are integrated within the polymeric body. The peristaltic pump has a maximum flow rate of 11 $\mu\text{l}/\text{min}$. This illustrates the possibilities and performance of the peristaltic pump in particular, as well as of the actuator technology in general. Finally, this thesis shows for the first time how the advantages of stacked dielectric elastomer actuators can be used for fluidic applications.



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak, der mir die Gelegenheit gab, auf dem interessanten und vielseitigen Gebiet der dielektrischen Elastomeraktoren zu arbeiten, mir einen großen Freiraum bei der Umsetzung gewährte und meine Arbeit durch seine stetige Diskussionsbereitschaft unterstützt hat.

Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Wallrabe danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die durch ihre Freundlichkeit und Offenheit für ein sehr angenehmes und kreatives Arbeitsklima sorgen. Insbesondere danke ich Marc Matysek für die sehr gute Zusammenarbeit und die vielen anregenden Diskussionen. Bernhard Jochem danke ich für die vielen kleinen und auch größeren Problemlösungen im Forschungs- und Institutsalltag. Weiterhin danke ich allen Studenten, die in Projektseminaren, Studien- und Diplomarbeiten einen Beitrag zur vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Meinen Eltern danke ich für ihre immer vorhandene Unterstützung. Schließlich danke ich meiner Frau Franziska, die mich stets ermutigt und unterstützt hat, für ihre Geduld und ihre Zuversicht.

Peter Lotz

Darmstadt, im Dezember 2009



Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen	IX
1 Einführung zur peristaltischen Fluidförderung mit dielektrischen Elastomeraktoren	1
1.1 Biologische Fluidförderung	1
1.2 Technische Fluidförderung	2
1.2.1 Peristaltische Schlauchpumpen	3
1.2.2 Peristaltische Mikropumpen	4
1.3 Elektroaktive Polymere	7
1.4 Inhalt und Aufbau der Arbeit	8
2 Dielektrische Elastomeraktoren	11
2.1 Geschichte der dielektrischen Elastomeraktoren	11
2.2 Funktionsprinzip der dielektrischen Elastomeraktoren	12
2.3 Dielektrische Elastomerstapelaktoren	17
3 Technologie dielektrischer Elastomerstapelaktoren	23
3.1 Dielektrikum	23
3.1.1 Materialeigenschaften von Elastosil® P7670	26
3.1.1.1 Bestimmung der Materialparameter	29
3.1.1.2 Einfluss der Vernetzungstemperatur	30
3.1.1.3 Einfluss der Frequenz	31
3.1.1.4 Einfluss der lateralen Dehnung	32
3.1.1.5 Einfluss der Schichtdicke	32
3.1.1.6 Mechanische Eigenschaften	33
3.1.2 Optimierung des Dielektrikums	34
3.1.2.1 Materialmodelle Permittivität	36
3.1.2.2 Materialmodelle Elastizitätsmodul	37
3.1.2.3 Füllstoffe zur Erhöhung der Permittivität dielektrischer Elastomer- aktoren	39
3.1.2.4 Kennzahl zur Beurteilung der Materialverbesserung	41
3.1.3 Materialoptimierung für dielektrische Elastomerstapelaktoren	41
3.2 Elektroden	46
3.2.1 Elektrodenmaterialien	54
3.2.2 Nichthomogene Elektroden	59
3.3 Herstellungstechnologie	66
3.3.1 Herstellung der dielektrischen Schicht	68
3.3.2 Herstellung der Elektroden	69
3.4 Verbesserung der Herstellungstechnologie	77
4 Messtechnik und Charakterisierung der Aktoreigenschaften	79
4.1 Kraft und Elastizität	80
4.2 Flächenwiderstand	81
4.3 Impedanzmessung	82
4.4 Auslenkungsmessung	83

5	Charakterisierung und Modellierung	87
5.1	Elektrisches Verhalten	87
5.1.1	Kontaktierung	87
5.1.2	Schichtwiderstand	88
5.2	Elektromechanisches Verhalten	88
5.2.1	Statische Auslenkung	89
5.2.2	Dynamische Auslenkung	93
6	Konzept der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomeraktoren	103
6.1	Funktionsweise der peristaltischen Fluidförderung	103
6.2	Konzeptvarianten der peristaltischen Fluidförderung mit dielektrischen Elastomerstapelaktoren	106
6.2.1	Schlauchpumpe	106
6.2.2	Kammerpumpe	110
6.2.2.1	Zirkulare Kammerpumpe	111
6.2.2.2	Axiale Kammerpumpe	112
6.3	Simulation der axialen Kammerpumpe	113
6.3.1	Simulation des mechanischen Verhaltens	114
6.3.1.1	Form des Kanalquerschnittes	115
6.3.1.2	Aufweitung des Pumpenkanals	115
6.3.1.3	Anzahl der Aktorelemente	116
6.3.2	Simulation der fluiddynamischen Leistungsfähigkeit	117
7	Peristaltische Pumpe aus Elastomerstapelaktoren	119
7.1	Geometrie	119
7.2	Herstellung	120
7.3	Ansteuerung	121
7.4	Charakterisierung der Pumpe	123
7.4.1	Elektromechanisches Verhalten	123
7.4.2	Fluidische Charakterisierung	125
8	Zusammenfassung und Ausblick	129
8.1	Weiterentwicklung der Herstellungstechnologie	129
8.1.1	Dielektrikum	129
8.1.2	Elektroden	130
8.1.3	Fazit	130
8.2	Charakterisierung und Modellierung	130
8.3	Peristaltische Pumpe	131
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang	149
A	Statische Auslenkungen	149
B	Mathematische Ergänzungen	151
B.1	Kettenleitermatrizen eines Elektrodenpaars	151
B.2	Berechnung des Kapazitätsbelags	152
B.3	Beurteilung der Widerstandshysterese von Elektroden	153

Verwendete Formelzeichen

Variablen

a	Abstand Linienleiter
a	peristaltischer Ruhedurchmesser bzw. Kanalhöhe
a_i	elektrostriktive Koeffizienten
b	Amplitude der Wandverformung
b	Breite eines Aktorelementes
b	Elektrodenabmessung in x -Richtung
b	Kanalbreite
b_s	Außenbreite eines Aktorelements der radialen Kammerpumpe
c	Dämpfungskoeffizient
c	Wellengeschwindigkeit
d	Elektrodenabstand
d	Partikeldurchmesser
d	Schichtdicke im Schleuderprozess
d_D	Gesamtdicke der dielektrischen Schichten im Stapelaktors
d_0	Dicke eines Stapelaktors
f	Frequenz
g	minimale Spaltbreite des Pumpenkanals
h	Elektrodenenddicke
h	Höhe
i	elektrischer Strom
k	Federkonstante
l	Elektrodenabmessung in y -Richtung
l	Länge eines Aktorelementes
m	Masse
n	Anzahl
p	Druck
p	Parameter eines fraktionalen Elementes
p_{el}	MAXWELL-Druck, elektrostatischer Druck im dielektrischen Elastomeraktor
Δp	Druckdifferenz
Δp_λ	Druckdifferenz pro Wellenlänge
q_v	Volumenstrom
r	Radius
r	radiale Koordinate im Zylinderkoordinatensystem
r_s	Radius eines Aktorelements der radialen Kammerpumpe
s	Exponent Perkulationsgleichung
t	Zeit
$t_{sprüh}$	Sprühdauer

u	elektrische Spannung
v	Geschwindigkeit
x	x -Koordinate
y	y -Koordinate
z	z -Koordinate
z_0	Einzelschichtdicke des Elastomeraktors
A	Fläche
A	Geometriekoeffizient
A_s	Fläche eines Aktorelements der radialen Kammerpumpe
B	Breite
B	Verhältnis der E-Moduln von Füllstoff und Matrix
C	elektrische Kapazität
C'	Kapazitätsbelag
C_v	spezifische Wärmekapazität
D	Durchmesser
E	elektrische Feldstärke
E_{\max}	elektrische Durchbruchfeldstärke
F	Kraft
G	Gesamtmenge Graphit im Sprühprozess
G	Schubmodul
H	Förderhöhe
I	elektrischer Strom
K_t	Wärmeleitfähigkeit
L	Länge
M	Modul allgemein
N	Anzahl
P	Leistung
P	Modul eines fraktionalen Elementes
Q	elektrische Ladung
R	elektrischer Widerstand
R_{\square}	Schichtwiderstand
Re	Reynoldszahl
S_A	Flächendehnung
S_x	Querdehnung in x -Richtung
S_y	Querdehnung in y -Richtung
S_z	Längsdehnung
T	absolute Temperatur
T	mechanische Spannung
U	Umfang
U	elektrische Spannung
V	Volumen
W	Energie
Y	Elastizitätsmodul

Y_c	uniaxiales Kompressionsmodul
Z	mechanische Impedanz
α	Amplitudenverhältnis
β	Ordnung einer fraktionalen Ableitung
γ	Anteil der Elektroden Dicke an der Gesamtdicke eines Stapelaktors
δ	Packungsdichtekoeffizient
δ	Pulsbreitenverhältnis
δ	Wellenordnung
ϵ_r	Dielektrizitätszahl
ϵ	Permittivität
ϵ_f	Dielektrizitätszahl Füllstoff
ϵ_k	Dielektrizitätszahl Komposit
ϵ_m	Dielektrizitätszahl Polymermatrix
η	Dämpfungsmodul
η	Viskosität
θ	Volumenanteil
θ_m	Volumenanteil Polymermatrix
θ_f	Volumenanteil Füllstoff
ϑ	Temperatur
κ	Materialkennzahl
λ	Linienladung
λ	Wellenlänge
ν	Poisson'sche Querkontraktionszahl
ν	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
σ	elektrische Leitfähigkeit
τ	Zeitkonstante
φ	Phasenverschiebung
ω	Kreisfrequenz
ω	Drehzahl
Φ	elektrisches Potenzial
\mathbf{e}	Einheitsvektor
\mathbf{p}	Ortsvektor zum Punkt \mathcal{P}
\mathbf{r}	Ortsvektor allgemein
\mathbf{A}	Kettenmatrix
\mathbf{D}	Verschiebungsdichte
\mathbf{E}	elektrische Feldstärke
ρ	Ladungsverteilung
Konstanten	
$\epsilon_0 = 8,854 \text{ F/m}$	elektrische Feldkonstante
$g = 9,807 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung



1 Einführung zur peristaltischen Fluidförderung mit dielektrischen Elastomeraktoren

Elektroaktive Polymere werden aufgrund ihrer Funktionsweise, Energiedichte und ihres Gewichts oft als künstliche Muskeln bezeichnet. Dabei assoziiert man gerne kräftige Skelettmuskeln, die schwere Gegenstände weit in die Luft heben. Wirbeltiere weisen aber noch eine zweite Art von Muskeln auf. Diese umgeben die inneren Organe und sorgen dafür, dass Flüssigkeiten oder allgemein Fluide durch den Körper transportiert werden. Bis vor wenigen Jahren war es praktisch unmöglich, diese aktiven Organwände technisch zu realisieren. Die Entwicklung von Polymeren, die aufgrund elektrischer Stimulation ihre Form verändern, bietet hierfür völlig neue Möglichkeiten. Eines dieser neuen Materialien sind dielektrischen Elastomeraktoren. In der vorliegenden Arbeit wird zum ersten Mal diese noch recht junge Technologie genutzt, um das aus der Natur bekannte Prinzip der peristaltischen Fluidförderung technisch umzusetzen.

1.1 Biologische Fluidförderung

Der Begriff *Peristaltik* beschreibt das Bewegungsmuster biologischer Hohlgorgane, wie es exemplarisch in Abbildung 1.1 dargestellt ist. Der griechische Ursprung der beiden Wortteile *peri* für „herum, umfassend“ und *staltikós* für „zusammendrückend“ spiegeln das zugrundeliegende Prinzip wider, etwas zu umfassen und zusammenzudrücken [XN+07]. Die Peristaltik gilt als das wichtigste biologische Transportsystem [BC06] und findet sich im menschlichen Körper vor allem in verschiedenen Organen des Verdauungssystems zum Transport von Stoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften.

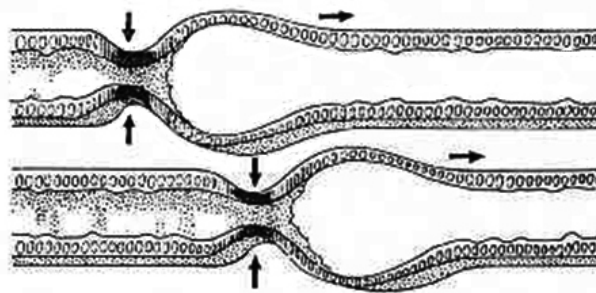


Abbildung 1.1: Peristaltische Bewegung eines Hohlorgans.

Auf der einen Seite befördern Speiseröhre und Darm breiige Stoffe, die auch Festkörper enthalten können. Auf der anderen Seite gibt es kleine transportierende Gefäße wie Harnleiter, Lymphgefäße und periphere Venen, deren Inhalt als newtonsche Flüssigkeit betrachtet werden können [LFL71; SS85].

Die Transportmechanismen von Harnleiter und Dünndarm sind von den genannten Organen am besten untersucht. Charakteristische Werte für diese beiden Beispiele sind in Tabelle 1.1 dargestellt. Wie durch die sehr unterschiedlichen Eigenschaften der geförderten Medien und die gezeigten Werte deutlich wird, ist die peristaltische Förderung für sehr unterschiedliche Medien und Volumenströme geeignet.

Tabelle 1.1: Charakteristische Größen von Harnleiter und Dünndarm hinsichtlich des peristaltischen Transportes [FY68; SS85]

Parameter	Einheit	Harnleiter	Dünndarm
Durchmesser D	mm	5	25
Länge L	cm	30	300
Wellenlänge λ	cm	8	8
Wellengeschwindigkeit c	cm/s	3 – 6	1
Amplitudenverhältnis α	1	1	0,6

Gemeinsam ist den beiden genannten Beispielen, dass die Organwand neben anderen Bestandteilen aus glatter Muskulatur besteht. Im Gegensatz zur gestreiften Muskulatur des Skeletts kann die glatte Muskulatur nicht bewusst gesteuert werden. Strömt ein Medium in das ruhende Hohlorgan, beispielsweise Urin aus der Niere in den oberen Teil des Harnleiters, so wird dieser Teil des Organs durch das einfließende Medium gedehnt. Mechanorezeptoren erfassen die Organdehnung und aktivieren ihrerseits die Muskelzellen, die das Organ kontrahieren [CP97; JS71]. Durch die Kontraktion wird das Flüssigkeitsvolumen entlang der Organachse transportiert. Einen Unterschied zwischen Harnleiter und Darm zeigt Tabelle 1.1 in Form des Amplitudenverhältnisses α . Dieses gibt an, ob das Organ offen ($\alpha = 0$), verengt ($0 < \alpha < 1$) oder komplett verschlossen ($\alpha = 1$) ist. Ein gesunder Harnleiter verschließt den Organquerschnitt vollständig und transportiert den kontinuierlich entstehenden Urin pulsierend mit einer mittleren Geschwindigkeit von 1 ml/min [Cum+01; SJW69].

1.2 Technische Fluidförderung

Technische Pumpen werden anhand ihres Funktionsprinzips in Strömungspumpen und Verdrängerpumpen unterteilt. Gemeinsam ist allen Pumpen, dass sie Energie auf ein Fluid übertragen. Strömungspumpen übertragen die Energie kontinuierlich, indem das Fluid beschleunigt wird. Verdrängerpumpen prägen dagegen eine Kraft diskontinuierlich auf das Fluid auf und erhöhen dessen Druck [Nel99; Vol05].

Das unterschiedliche Funktionsprinzip zeigt sich auch im Verhalten der beiden Pumpentypen. Abbildung 1.2 zeigt qualitativ den Kennlinienverlauf der beiden Pumpengruppen. Strömungspumpen zeigen im allgemeinen eine flache, gekrümmte Kennlinie. Kleine Änderungen des Gegendruckes p beeinflussen den Volumenstrom q_v deutlich. Die ideale Verdrängerpumpe hingegen besitzt eine senkrechte Kennlinie. Der am Pumpenauslass herrschende Gegendruck p beeinflusst den Volumenstrom q_v nicht. Reale Pumpen zeigen eine lineare, aber geneigte Kennlinie, da die Leistung des Pumpenantriebs einen maximalen Druck p definiert, bei dem der Volumenstrom q_v zum Erliegen kommt.

Peristaltische Pumpen zählen zu der Gruppe der Verdrängerpumpen und zeigen Kennlinien, die ebenfalls gerade oder leicht gekrümmt sind [Nel99; Nes04]. Es sind hierbei zwei grundsätzlich unterschiedliche Varianten zu unterscheiden. Auf der einen Seite sind dies Schlauchpumpen, die technologisch ausgereift sind und in unterschiedlichen Größenordnungen in der Labor-, Medizin-, Verfahrens- und Umwelttechnik eingesetzt werden. Auf der anderen Seite miniaturisierte Pumpen, die im Bereich der Mikrosystemtechnik erforscht und entwickelt werden.

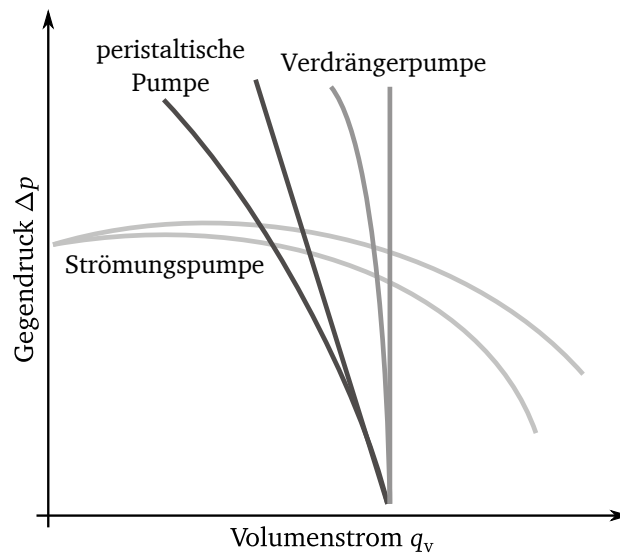


Abbildung 1.2: Qualitativer Verlauf der Kennlinien von Pumpen nach dem Strömungsprinzip und Verdrängerprinzip sowie dem Spezialfall peristaltische Pumpe.

1.2.1 Peristaltische Schlauchpumpen

Die Entwicklung der Schlauchpumpe begann in der Mitte des letzten Jahrhunderts. Das zentrale Element, das Hohlorgan, wird hier durch einen flexiblen Schlauch ersetzt, der, wie in Abbildung 1.3 schematisch dargestellt ist, durch Rollen oder Finger periodisch zusammengedrückt wird. Die Mindestanzahl an Elementen, die über den Schlauch geführt werden liegt bei zwei. In diesem Fall zeigt das ausströmende Medium aber eine starke Pulsation. Um diese zu verringern werden je nach Anforderung an die Gleichmäßigkeit bis zu sieben Rollen in einer Pumpe eingesetzt [Nes06]. Eine hohe Anzahl sich bewegender Elemente und damit eine geringe Pulsation zeigen Fingerschlauchpumpen. In diesen verformen nebeneinanderliegende Elemente den Schlauch in einem periodischen Muster. Die Abbildungen 1.3(b) und 1.4(a) zeigen, dass der Mechanismus einer solchen Pumpe durch eine Welle mit mehreren Exzentrerscheiben sehr platzsparend realisiert werden kann [WR07].

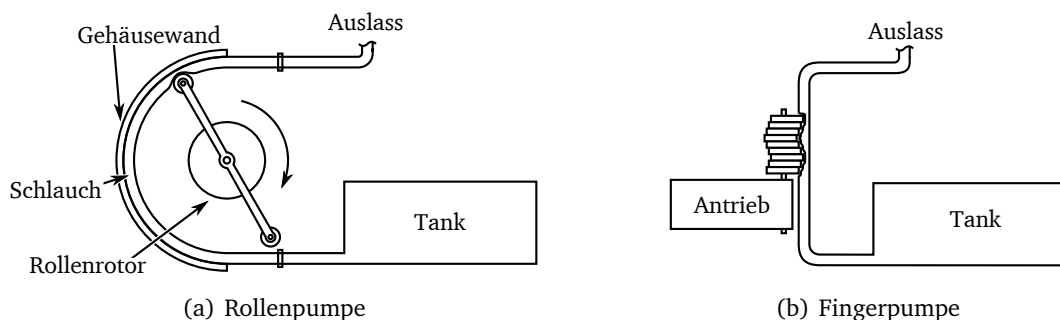


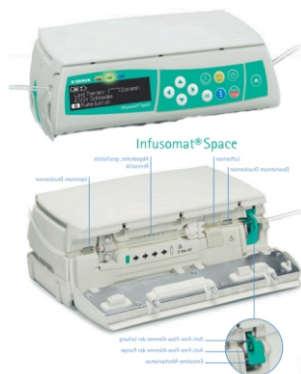
Abbildung 1.3: Schematische Darstellung peristaltischer Schlauchpumpen.

Ein wichtiger Vorteil dieser Pumpe und oftmals Hauptgrund für ihren Einsatz ist, dass das zu fördernde Medium ausschließlich mit der Innenseite des Schlauchs in Kontakt kommt. Das Pumpsystem ist durch Wechseln des Schlauches einfach zu reinigen bzw. zu dekontaminieren und damit ideal für einen hygienischen Einsatz im medizinisch-pharmazeutischen Bereich [Orc04]. Das Schlauchmaterial kann je nach Anforderung des Fluids ausgewählt werden, muss jedoch hochelas-

tisch sein, da die Antriebsrollen es sehr stark mechanisch belasten. Da der Schlauch andererseits als Einwegartikel konzipiert sein kann, ist es leicht, die in der Medizintechnik geforderte Sterilität, z. B. in Dialysegeräten, zu gewährleisten. Für den Einsatz in der Dialyse kommt eine weitere Eigenschaft der Peristaltik besonders zum Tragen. Im allgemeinen bildet sich eine laminare Strömung aus, sodass im Vergleich zur hohen Umlaufgeschwindigkeit eines Flügelrades keine großen Relativgeschwindigkeiten zwischen Bauteilen der Pumpe und dem zu fördernden Fluid entstehen. In anderen Pumpenbauarten führen solch hohe Geschwindigkeiten zu viskosen Scherungen, die lebende Zellen (z. B. Hefezellen, Erythrozyten o. ä.) derart beanspruchen, dass deren Zellmembran reißen kann [AZJ09; NMD00].

Ein dritter hervorzuhebender Vorteil ist, dass Schlauchpumpen auch Fluide mit einem sehr hohen Feststoffanteil fördern können. Einzelne Festkörper können fast so groß wie der Schlauchdurchmesser sein, ohne dass es zu einem Ausfall der Pumpe kommt. Leistungsstarke Varianten werden daher zum Abpumpen von Abwasser und Schlämmen verwendet [Nes04].

Entsprechend den Anwendungen variieren auch die Größen der Pumpen. Angefangen bei kleinen Labor- und Medikamentenpumpen mit Schlauchdurchmessern von 0,8 mm, Abbildung 1.4(a) und Abbildung 1.4(b), bis hin zu Großpumpen mit 125 mm, Abbildung 1.4(c). Die Förderraten decken einen entsprechend großen Bereich zwischen 1 ml/h und bis zu 3000 m³/h ab. Der Wirkungsgrad dieser Pumpen ist mit 50 % im Vergleich mit klassischen Verdrängungs- oder Strömungspumpen eher gering [Nes04; Nes06].



(a) Medizintechnik



(b) Labortechnik



(c) Umwelttechnik

Abbildung 1.4: Peristaltische Schlauchpumpen unterschiedlicher Größe und Anwendung [BBr08; Orc04].

1.2.2 Peristaltische Mikropumpen

Neben der oben dargestellten Schlauchpumpe findet die peristaltische Fluidförderung durch die Miniaturisierung der Feinwerk- und Mikrotechnik einen weiteren Weg der technischen Umsetzung.

Der Beginn der Entwicklung miniaturisierter Pumpen kann bereits auf Mitte der 1970er Jahre mit der Veröffentlichung erster miniaturisierter Pumpen durch THOMAS und BESSMAN im Jahr 1975 und durch SPENCER u. a. im Jahr 1978 datiert werden [Spe+78; TB75]. Diese Pumpen sind noch feinwerktechnische Geräte, die aus konventionellen Materialien wie Edelstahl hergestellt werden. Der Antrieb erfolgt aber bereits piezoelektrisch [Woi05].

Die erste Pumpe als mikromechanisches System ist 1980 in Stanford von SMITS entwickelt worden [Lin+88]. Das erste Dokument hierüber ist ein Patent aus dem Jahr 1985 [Smi85]. SMITS publiziert selbst erst im Jahr 1990 über seine eigene Arbeit [Smi90].

Die früheste „richtige“ Veröffentlichung stammt damit von VAN LINTEL aus dem Jahr 1988 [Lin+88]. Die dort vorgestellte Pumpe besteht aus Silizium und besitzt eine Pumpkammer, die Strömungsrichtung wird durch zwei passive Ventile gewährleistet.

Diese frühen Entwicklungen zeigen schon die Richtung auf, wie miniaturisierte Pumpen bis heute zum Großteil arbeiten. In der Regel besitzen die Pumpen eine bis drei Pumpenkammern und gegebenenfalls Ventile, um der Strömung des Fluids eine Vorzugsrichtung zu geben.

In der Literatur werden alle diese nach dem Verdrängerprinzip arbeitenden Pumpen mit mehr als einer Kammer als *miniaturisierte peristaltische Pumpen* bezeichnet. BERG u. a. schlagen eine Unterscheidung dieser Pumpen vor, je nachdem, ob die Pumpe diskrete Kammern aufweist, oder das Fluid durch eine kontinuierliche Verformung des Pumpenquerschnitts beschleunigt [Ber+03] wird.

Diskrete peristaltische Pumpen bieten den Vorteil, dass die Pumpenkammern eine definierte Form und Größe haben, die sich sehr gut an verwendete Materialien und Technologien anpassen lassen. Wie es beispielhaft in Abbildung 1.5 zu sehen ist, ist es jedoch oft unvermeidlich, dass durch die Notwendigkeit, die Kammern mit Kanälen zu verbinden, eine Vielzahl von Ecken und Kanten entstehen. Diese wiederum beeinträchtigen die Eignung solcher Pumpen für den Transport von ungefilterten Medien, da sich Partikel aus dem Fluid bevorzugt an Ecken und Hinterschneidungen absetzen.

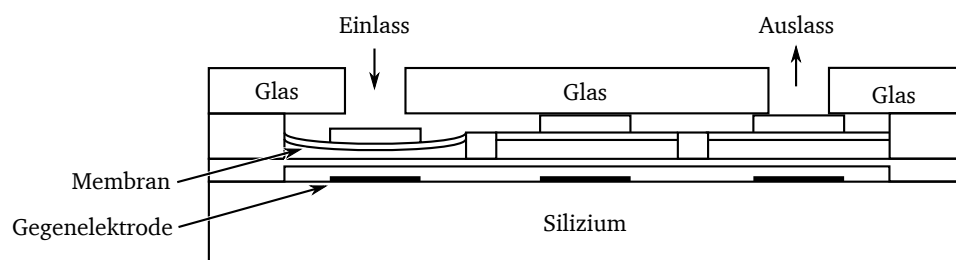


Abbildung 1.5: Viele peristaltische Pumpen besitzen eine Vielzahl von Ecken und Kanten innerhalb des fluidischen Kanals. Hier beispielhaft an einer Pumpe von TEYMOORI und ABBASPOUR-SANI gezeigt [TAS05].

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen zeigt diese Art von fluidischem Fördersystem als Realisierung einer diskreten peristaltischen Pumpe. Die gezeigten Pumpen unterscheiden sich vor allem in den Aufbaumaterialien sowie durch die benutzten Antriebsprinzipien. Eine Übersicht über die erreichbaren Kennwerte zeigt Abbildung 1.6 exemplarisch anhand publizierter Werte der letzten Jahre. Typische Gegendrucke liegen demnach im Bereich zwischen 1 kPa und 100 kPa und es werden auf die Pumpenfläche normierte Volumenströme zwischen $0,01 \mu\text{l}/(\text{min mm}^2)$ und $2 \mu\text{l}/(\text{min mm}^2)$ erreicht [IG08].

Dagegen wurden kontinuierliche peristaltische Pumpen bisher nur in wenigen Veröffentlichungen präsentiert. Diese Art des Pumpendesigns zeichnet sich dadurch aus, dass im fluidischen Kanal ebenso wie bei der Schlauchpumpe sowohl auf scharfe Kanten, als auch auf sich schnell bewegende Teile verzichtet werden kann.

Miniaturisierte Varianten der makroskopischen Schlauchpumpe zeigten GU u. a. und TUNG, TORISAWA YU-SUKE FUTAI und SHUICHI. In beiden Arbeiten werden Fluidkanäle aus einem elastischen Po-

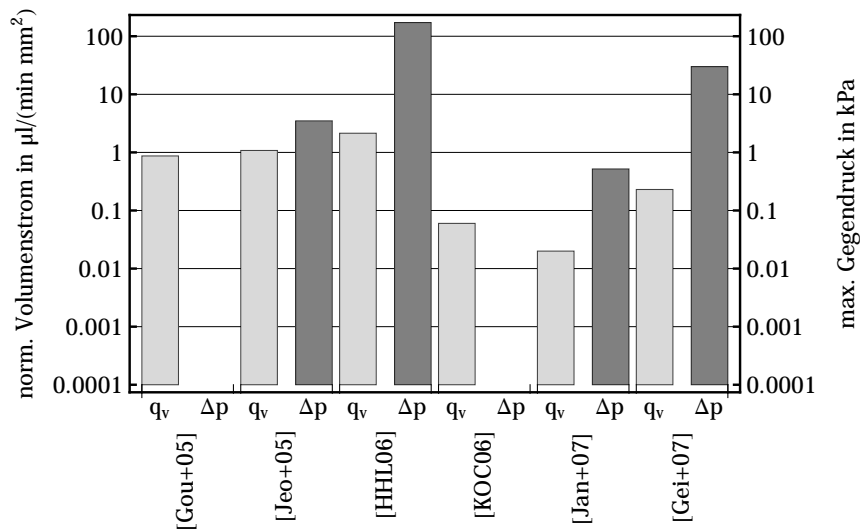


Abbildung 1.6: Übersicht über Kennwerte aktueller miniaturisierter peristaltischer Mikropumpen nach IVERSON und GARIMELLA. Die Volumenströme sind zur besseren Vergleichbarkeit auf die Plattformfläche normiert [IG08].

lymer mit Hilfe von kommerziellen Braille-Displays peristaltisch verformt. In den Braille-Displays¹ bewegen piezoelektrische Aktoren kleine Stifte in vertikaler Richtung gegen den elastischen Kanal. Mit diesem System konnten Volumenströme zwischen 20 nl/s und 370 nl/min erreicht werden. Über die maximalen Drücke werden keine Angaben gemacht [Gu+04; TTYFS07].

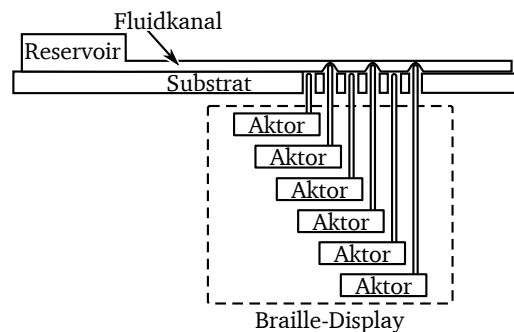


Abbildung 1.7: Funktionsweise der peristaltischen Pumpen mit Braille-Displays nach GU u. a. und TUNG, TORISAWA YU-SUKE FUTAI und SHUICHI.

CHANG und BAR-COHN präsentierten im Jahr 1999 eine kontinuierliche peristaltische Pumpe, die auf einem Piezoscheibenmotor basiert [CBC99]. Abbildung 1.8 zeigt die Verformung des kreisrunden Pumpenkörpers der aus Kunststoff und Messing besteht. Piezoelektrische Elemente verformen einen Teil der Pumpe in dem gezeigten Muster, sodass eine Flüssigkeit in die Hohlräume einströmen und transportiert werden kann [BCC00; BCC01]. Mit dieser Pumpe wurden Volumenströme von bis zu 4,5 ml/min und maximale Drücke von 1,1 kPa erreicht [BCC01].

¹ Braille-Displays bestehen in der Regel aus einer Zeile mehrerer Braille-Zellen. Jede Zelle kann mit Hilfe von sechs oder acht Stiften die Zeichen des Braille-Alphabets darstellen, die von Blinden mit dem Finger ertastet werden können. Jeder einzelne Stift wird durch einen eigenen Aktor, in der Regel ein piezoelektrischer Biegeaktor, bewegt.

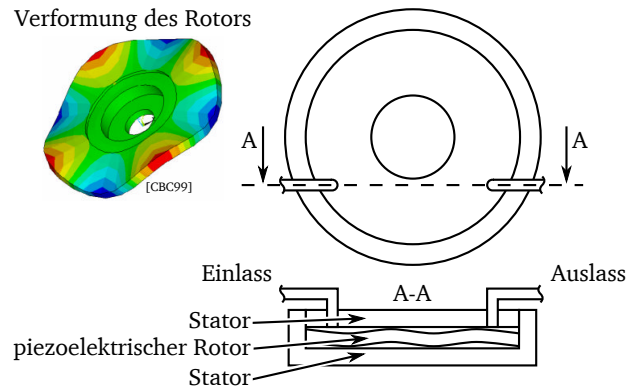


Abbildung 1.8: Rotationssymmetrische peristaltische Pumpe von BAR-COHN und CHANG [BCC00].

Dieses Beispiel zeigt, dass durch die Verwendung elektroaktiver Materialien, wie den hier verwendeten piezoelektrischen Keramiken, eine direkte Umsetzung des biologischen Hohlorgans in ein technisches Gerät möglich wird.

GALL, THIELICKE und HUART stellten 2006 das Konzept einer linearen kontinuierlichen peristaltischen Pumpe vor. Der Pumpenkörper besteht ebenfalls aus piezoelektrischen Elementen [GTH06]. Mehrere Biegeaktoren sind linear nebeneinander angeordnet. Die Simulation der Verformung in Abbildung 1.9(a) zeigt, dass mit diesem Ansatz die technische Realisierung dem biologischen Vorbild schon sehr nahe kommt. Der maximale erreichbare Volumenstrom beträgt $4,2 \mu\text{l}/\text{min}$ [Sch+08].

Dieses Beispiel erreicht allerdings noch nicht die Flexibilität von organischem Gewebe, diese Pumpe ist starr. Die Konstruktion einer peristaltischen Pumpe, die sowohl das biologische Funktionsprinzip adaptiert, aktive Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoff nutzt und dabei flexibel wie das biologische Gewebe bleibt, wird erst durch den Einsatz elektroaktiver Polymere möglich.

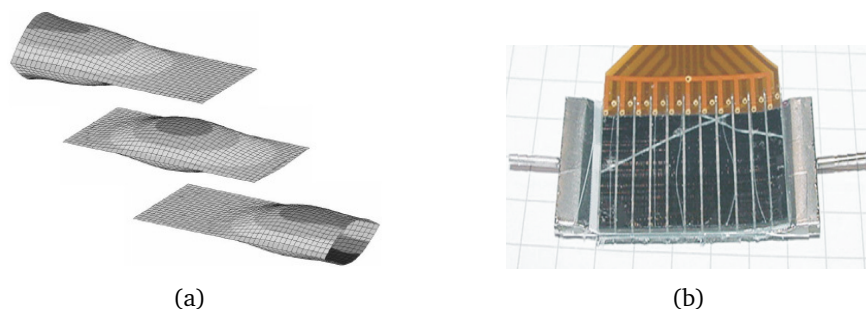


Abbildung 1.9: Peristaltische Pumpe mit piezoelektrischen Biegeaktoren von GALL, THIELICKE und HUART. (a) Simulation der Gehäuseverformung; (b) Prototyp [GTH06; Sch+08].

1.3 Elektroaktive Polymere

Abbildung 1.10 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Arten elektroaktiver Polymere, die selbst nur eine mehrerer Klassen feldsensitiver Polymere sind. Die hier gegebene Übersicht ist bewusst kurz gefasst, für eine ausführliche Darstellung der unterschiedlichen Materialien sei auf die Standardwerke z. B. von BAR-COHN verwiesen [BC01; BC06].

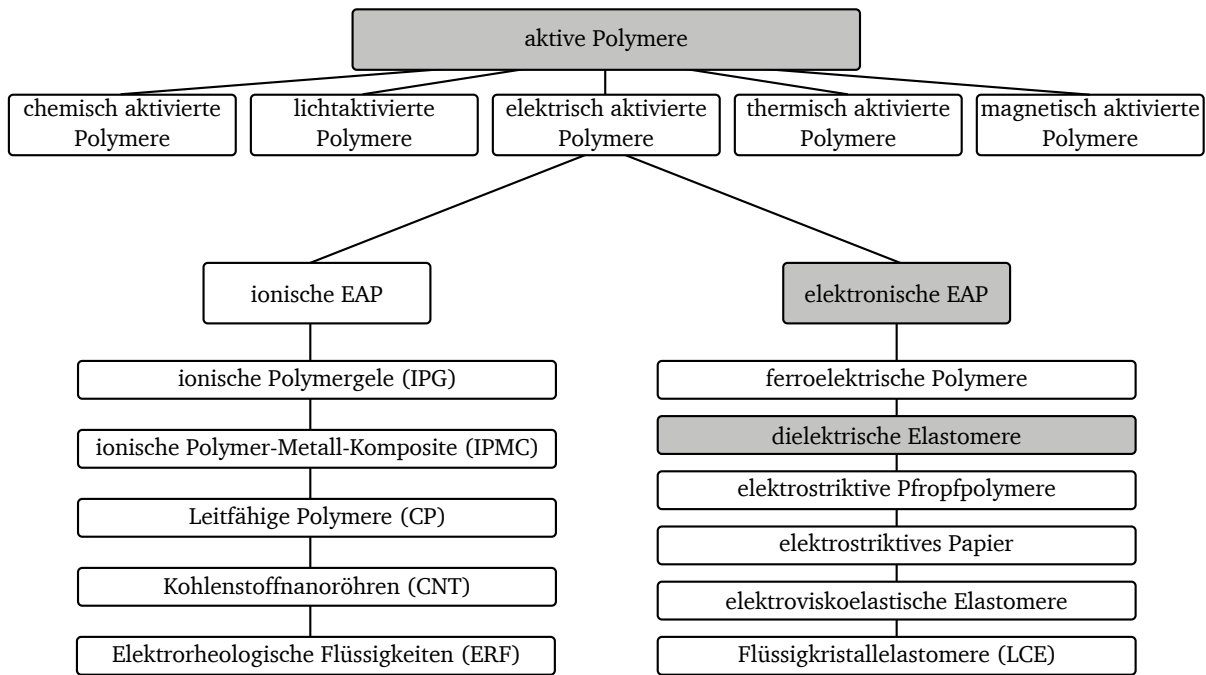


Abbildung 1.10: Übersicht über die verschiedenen Arten elektroaktiver Polymere.

Die elektroaktiven Polymere werden üblicherweise nach dem Ladungsträger unterschieden, die für die verschiedenen Verformungseffekte verantwortlich sind. Auf der einen Seite existieren Polymere, die ein bestimmtes Maß an Ionenleitfähigkeit aufweisen. Die Ionenkonzentration in den Materialien kann durch ein elektrisches Feld beeinflusst werden. In erhöhter Konzentration führen die Ionen zu einer Schwellung des Materials. Diese äußert sich makroskopisch in einer Dehnung oder Biegung der Aktoren.

Die andere Klasse elektroaktiver Polymere reagiert direkt auf ein elektrisches Feld, dessen Mittler Elektronen sind. Ein Großteil der Forschung erfolgt aktuell auf dem Gebiet der dielektrischen Elastomeraktoren. Diese Aktoren zeichnen sich durch eine einfache Struktur und Herstellung sowie günstige Ausgangsmaterialien aus. Sie sind leicht, elastisch und flexibel und können in den unterschiedlichsten Bauformen hergestellt werden. Die elektroaktiven Eigenschaften entstehen durch das Einbringen leitfähiger Strukturen in den Polymerkörper. Es ist daher möglich, aktive dreidimensionale Strukturen wie die oben gezeigte kontinuierliche peristaltische Pumpe aufzubauen, die Konstruktions- und Funktionselemente nahtlos miteinander integriert.

1.4 Inhalt und Aufbau der Arbeit

Für die Herstellung dielektrischer Elastomeraktoren im Allgemeinen und Elastomerstapelaktoren im Speziellen stand bisher kein Standardverfahren zur Verfügung. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit sowohl ein Herstellungsverfahren weiterentwickelt und stabilisiert, um Aktoren mit reproduzierbaren Eigenschaften herstellen zu können. Desweiteren wurde das peristaltische Fluidfördersystem und die dielektrischen Elastomerstapelaktoren zueinander passend ausgelegt und realisiert.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier Teile. Nach der bereits erfolgten Einführung in die peristaltische Fluidförderung und die Diskussion der möglichen technischen Umsetzungen vertie-

fen die nachfolgenden Kapitel die Technologie der Elastomeraktoren sowie das damit aufgebaute peristaltische Fluidfördersystem.

Zunächst stellt der zweite Teil der Arbeit die Technologie der dielektrischen Elastomeraktoren vor. Ausgehend vom Funktionsprinzip werden mögliche Bauformen sowie die Herstellung der Aktoren vorgestellt und diskutiert. Ausführlich wird dann auf die beiden Grundelemente Dielektrikum und Aktorelektrode eingegangen. Jeder Abschnitt beginnt mit einem Überblick über den aktuellen Stand der Technik. Im weiteren Verlauf wird dann gezeigt, welche Teilaspekte für die hier im Vordergrund stehenden Elastomerstapelaktoren im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt wurden.

Für die Charakterisierung der entwickelten Aktorelemente sind spezielle Messplätze erforderlich. Im dritten Teil werden diese zunächst vorgestellt. Danach folgt die Diskussion des statischen und dynamischen Verhaltens dielektrischer Elastomerstapelaktoren anhand von Messergebnissen und analytischen Modellen.

Der vierte Teil beinhaltet die Konzeption und Realisierung des peristaltischen Fluidfördersystems. Ausgehend von den Anforderungen der Fluidförderung und den technologischen Randbedingungen wird die peristaltische Pumpe entworfen.

Die Arbeit schließt mit der Darstellung und Diskussion der Leistungsfähigkeit der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomeraktoren.



2 Dielektrische Elastomeraktoren

Der Name *dielektrischer Elastomeraktor* ist historisch begründet, da die ersten Anwendungen dieses elektroaktiven Werkstoffs reine Aktoren waren. Tatsächlich kann das Material aber die Funktionen eines Aktors, eines Sensors, eines Generators und eines Konstruktionswerkstoffes übernehmen. Während die Wandlung von elektrischer in mechanischer Energie die klassische Anwendung darstellt, rückt die sensorische und generatorische Anwendung seit etwa drei Jahren immer mehr in den Fokus aktueller Forschungsaktivitäten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden dielektrische Elastomeraktoren erstmals konsequent als aktorischer Funktions- und Konstruktionswerkstoff zum Aufbau einer peristaltischen Pumpe genutzt.

2.1 Geschichte der dielektrischen Elastomeraktoren

Der den dielektrischen Elastomeraktoren zugrunde liegende Effekt, mechanische Spannungen in einem dielektrischen Festkörper durch elektrische Felder zu erzeugen, ist seit über hundert Jahren bekannt und findet sich dementsprechend auch schon in Lehrbüchern aus der Mitte des 20. Jahrhunderts [Tou56]. Erstmals technisch aufgegriffen und systematisch untersucht wurde dieser Effekt in den 1980er Jahren im Zusammenhang mit Kunststoffen wie z. B. Polyvinylidenfluorid (PVDF) und Polyurethan (PU), die ein entsprechendes elektromechanisches Verhalten aufweisen. ANDERSON zeigte, dass zwei Effekte Ursache des elektroaktiven Verhaltens von Polymeren sein können [And86]. Beiden Effekten ist gemeinsam, dass die elektrische Feldstärke E quadratischen Einfluss auf die entstehende mechanische Spannung T hat: [KRB99]

$$T = -\frac{1}{2}\varepsilon_0 \left[\varepsilon_r \cdot (1 + 2\nu) - \left[a_1 \left(\frac{d\varepsilon_r}{dS} \right) + a_2 \left(\frac{d\varepsilon_r}{dS} \right) \cdot (1 - 2\nu) \right] \right] E^2 \quad (2.1)$$

Der linke Term in Gleichung (2.1) beschreibt den ersten Effekt und wird MAXWELL-Spannung oder MAXWELL-Druck genannt und zeichnet sich dadurch aus, dass die Proportionalität zwischen quadrierter Feldstärke und mechanischer Spannung vor allem durch eine konstante relative Permittivitätszahl ε_r des Dielektrikums definiert wird. Damit tritt die MAXWELL-Spannung bei praktisch jedem elastischen Material auf. Die durch die mechanische Spannung entstehende Stauchung ist abhängig von der Elastizität des beobachteten Materials. Eine ausführliche Herleitung dieses Terms wird in Abschnitt 2.2 gezeigt.

Der zweite Effekt ist die *Elektrostriktion* und wird durch den rechten Summand in Gleichung (2.1) beschrieben. Die Koeffizienten a_1 und a_2 sind Funktionen der Dehnungsabhängigkeit der Permittivität $d\varepsilon_r/dS$ [SK96]. Dieser Effekt wird daher als die direkte Kopplung zwischen elektrischer Polarisation und einer mechanischen Antwort in Form einer Dehnung des Materials aufgefasst [DDT06]. Dieser Effekt tritt also nur auf, wenn das dielektrische Material eine dehnungsabhängige Permittivität besitzt [KRB99]. Im Gegensatz zum MAXWELL-Effekt ist die Elektrostriktion daher ein materialspezifisches Phänomen. Auch die Vorzeichen der Koeffizienten a_i sind materialabhängig. Elektrostriktive Materialien können daher durch ein elektrisches Feld gedehnt oder gestaucht werden.

Elastomere, deren Molekülketten nur leicht miteinander vernetzt sind, zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen Elastizitätsmodul und Volumenkompressibilität. Oberhalb der Glasstemperatur verhalten sie sich wie eine Flüssigkeit und sind nahezu inkompressibel. KRAKOVSKY, ROMIJN und BOER zeigten, dass für diese Materialien aufgrund der Poissonschen Querkontraktionszahl $\nu \approx 0,5$ der MAXWELL-Effekt wesentlich größer als die Elektrostriktion ist [KRB99], da der Term mit a_2 in Gleichung (2.1) in diesem Fall verschwindet.

Die intensive Arbeit mit dielektrischen Elastomeraktoren begann mit den Arbeiten von PELRINE, KORNBLUH und HEYDT aus dem SRI *International*¹, die vor allem aus der Zeit zwischen 1995 und 2000 stammen [Pel+97]. Ursprüngliches Ziel der Arbeit am SRI war, leichte Aktoren für Roboter zu entwickeln. Schnell wurde das Potenzial dieser neuen Technologie und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten erkannt. So demonstrierten HEYDT u. a., dass mit einem Film aus Silikon und Graphitpulverelektroden Hörschall im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 2000 Hz erzeugt werden kann [Hey+98]. Weitere Demonstrationsobjekte für die Vielseitigkeit dielektrischer Elastomeraktoren waren neben Lautsprechern Ventile, Pumpen, optische Blenden, Rotationsantriebe und Beine für Laufroboter [Pel+01].

Der Umfang der damaligen Arbeiten innerhalb des SRI zeigt sich nicht nur in der Fülle der erdachten und überprüften möglichen Anwendungen für dielektrische Elastomeraktoren. Auch fast alle in den Folgejahren präsentierten Bauformen dielektrischer Elastomeraktoren wurden bereits durch Mitarbeiter des SRI vorgestellt [Pel+97].

Darüber hinaus entstammt auch die grundlegende Modellbildung den Labors des SRI. PELRINE, KORNBLUH und JOSEPH stellten umfassend das Funktionsprinzip dielektrischer Elastomeraktoren dar [PKJ98] und beschrieben die elektromechanische Wandlung allgemein. HEYDT u. a. betrachteten darüberhinausgehend speziell die elektro-akustische Wandlung des oben erwähnten Lautsprechers [Hey+98; Hey+00]. In den frühen Veröffentlichungen wird noch durchgehend von elektrostriktiven Effekten gesprochen, die für die elektromechanische Wandlung in diesen Aktoren verantwortlich sei. Aufgrund der dort aufgeführten mathematischen Beschreibungen ist jedoch ersichtlich, dass die Autoren schon von Beginn an die elektromechanische Wandlung der dielektrischen Aktoren tatsächlich mit dem *Maxwell*-Druck zwischen zwei Elektroden erklären.

2.2 Funktionsprinzip der dielektrischen Elastomeraktoren

Abbildung 2.1 verdeutlicht das Funktionsprinzip dielektrischer Elastomeraktoren. Elastische Elektroden stauchen das Dielektrikum aufgrund des elektrostatischen Druckes, der entsteht, sobald eine elektrische Spannung U an die Elektroden angelegt wird.

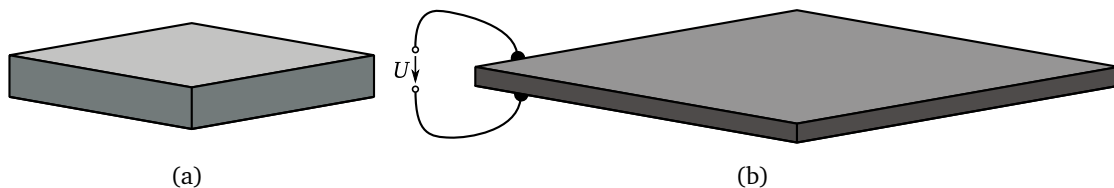


Abbildung 2.1: Funktionsprinzip dielektrischer Elastomeraktoren. Der Druck zwischen elastischen Elektroden staucht das Dielektrikum.

¹ Stanford Research Institute International, Menlo Park, CA

Durch das an den Elektroden anliegende elektrostatische Feld entsteht ein Druck in Feldrichtung. Das elastische Dielektrikum verformt sich dadurch soweit, bis sich ein Gleichgewicht aus dem MAXWELL-Druck zwischen den Elektroden und den Materialspannungen des Dielektrikums einstellt.

Die Kraft zwischen den zwei Elektroden dieses Kondensators kann mit Hilfe einer virtuellen Ver-rückung einer Elektrode berechnet werden. Hierzu wird angenommen, dass beide Elektroden an eine Quelle mit fester Spannung U angeschlossen sind und eine Elektrode um ein Wegelement dz verschoben wird. Bei diesem Vorgang ändert sich die Gesamtenergie des Systems W_{ges} nicht, die Energieänderung dW_{ges} kann aber in drei Komponenten aufgeteilt werden:

$$dW_{\text{ges}} = d(W_{\text{m}} + W_{\text{e}} + W_{\text{q}}) = dW_{\text{m}} + dW_{\text{e}} + dW_{\text{q}} = 0 \quad (2.2)$$

- die mechanische Energie W_{m} nimmt zu, wenn das Material durch die Verschiebung um dz gestaucht wird.

$$dW_{\text{m}} = F \cdot dz \quad (2.3)$$

- die elektrische Energie W_{e} nimmt zu, wenn die Elektrodenverschiebung die Kapazität vergrößert.

$$dW_{\text{e}} = d\left(\frac{1}{2} U^2 C\right) = \frac{1}{2} U^2 dC \quad (2.4)$$

- die Energie der Quelle W_{q} nimmt ab, wenn die Kapazität des Kondensators anwächst, denn die Ladung eines Kondensators Q und dessen Kapazität C sind über

$$W_{\text{q}} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad \text{bzw.} \quad Q = C U$$

mit der Energie verknüpft. Werden die Elektroden aufeinander zu bewegt, fließen Ladungen aus der Quelle auf die Elektroden. Für die Änderung der Energie in der Quelle gilt dann:

$$\begin{aligned} dW_{\text{q}} &= -U i dt \\ &= -U dQ = -U d(C U) = -U^2 dC \end{aligned} \quad (2.5)$$

Werden die drei Gleichungen (2.3), (2.4) und (2.5) in Gleichung (2.2) eingesetzt, ergibt sich:

$$F \cdot dz + \frac{1}{2} U^2 dC - U^2 dC = 0 \quad (2.6)$$

$$F \cdot dz = \frac{1}{2} U^2 dC \quad (2.7)$$

Die Kraft, die das elektrostatische Feld erzeugt, ist also eine Funktion der Kapazitätsänderung. Für eine Anordnung zweier paralleler Elektroden beträgt die Kapazität C , wenn eine Platte um Δz ausgelenkt wird:

$$C(\Delta z) = \frac{\varepsilon A}{z_0 + \Delta z} \quad (2.8)$$

In Abbildung 2.2 sind die Dimensionen eines elastischen Dielektrikums gezeigt, das unter Einwirkung einer Kraft \mathbf{F} um einen Weg $\Delta z < 0$ gestaucht wird.

Aufgrund der Volumenkonstanz von Elastomeren [Gen92] hat diese Dehnung oder Stauchung in Richtung der wirkenden Kraft eine Änderung der Querschnittsfläche A_0 zur Folge:

$$\begin{aligned} V &\stackrel{!}{=} \text{const.} = A_0 \cdot z_0 \\ &= (A_0 + \Delta A) \cdot (z_0 + \Delta z) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Die sich ergebenden Geometrieänderungen werden auf die Größe im unbelasteten Zustand bezogen und als Dehnung bezeichnet:

$$\text{Flächendehnung: } S_A = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (2.10)$$

$$\text{Längsdehnung: } S_z = \frac{\Delta z}{z_0} \quad (2.11)$$

Ausgehend von Gleichung (2.9) hängen Flächen- und Längsdehnung in folgender Weise voneinander ab:

$$\begin{aligned} A_0 \cdot z_0 &= (A_0 + \Delta A) \cdot (z_0 + \Delta z) \\ \frac{A_0 \cdot z_0}{z_0 + S_z z_0} &= A_0 (1 + S_A) \\ \Rightarrow \frac{1}{1 + S_z} &= (1 + S_A) \end{aligned}$$

Zusammenfassend gilt also für die Beziehung zwischen Flächendehnung S_A und Längsdehnung S_z :

$$S_A = \frac{\Delta A}{A_0} = -\frac{S_z}{1 + S_z} \quad (2.12)$$

Wird das Dielektrikum in Form einer Auslenkung Δz verformt, so verändert sich die Querschnittsfläche A senkrecht zur Auslenkungsrichtung um die Fläche ΔA :

$$\begin{aligned} A(\Delta z) &= A_0 + \Delta A(\Delta z) \\ &= A_0 + S_A A_0 \\ &= A_0 + A_0 \left(\frac{-S_z}{1 + S_z} \right) \\ &= A_0 \left(1 - \frac{\frac{\Delta z}{z_0}}{1 + \frac{\Delta z}{z_0}} \right) = A_0 \left(1 - \frac{\Delta z}{z_0 + \Delta z} \right) \\ &= A_0 \frac{z_0 + \Delta z - \Delta z}{z_0 + \Delta z} = A_0 \frac{z_0}{z_0 + \Delta z} \end{aligned} \quad (2.13)$$

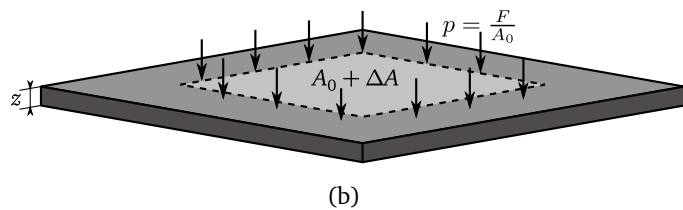
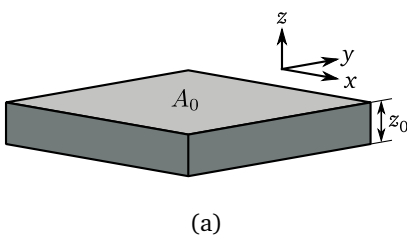


Abbildung 2.2: Deformation eines elastischen Dielektrikums durch mechanische Belastung.

Die Auslenkung dielektrischer Aktoren Δz_{DEA} wird immer durch eine Stauchung des Materials verursacht. Unter Berücksichtigung der Wahl des Koordinatensystems in Abbildung 2.2 gilt daher:

$$\Delta z_{\text{DEA}} = -\Delta z \quad (2.14)$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden Aktorauslenkungen immer positiv beschrieben. Aufgrund dieser Vorzeichenumkehr folgt somit für die Kapazität C aus den Gleichungen (2.8) und (2.13):

$$C(\Delta z) = \frac{\varepsilon A_0 z_0}{(z_0 - \Delta z)^2} \quad (2.15)$$

Für die mechanische Arbeit W_m aus Gleichung (2.7) ergibt sich daher mit Gleichung (2.15):

$$F_z dz = \frac{1}{2} U^2 d \left\{ \frac{\varepsilon A_0 z_0}{(z_0 - \Delta z)^2} \right\} \quad (2.16)$$

Folglich erhält man die durch das elektrostatische Feld erzeugte Kraft F_z durch Differenzieren von Gleichung (2.16):

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{1}{2} U^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{A_0 \varepsilon z_0}{(z_0 - \Delta z)^2} \right\} \\ &= \frac{1}{2} U^2 A_0 \varepsilon z_0 \frac{-2}{(z_0 - \Delta z)^3} (-1) \\ &= \frac{1}{2} U^2 A_0 \varepsilon z_0 \frac{2}{(z_0 - \Delta z)^3} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Der MAXWELL-Druck ergibt sich nun abschließend, indem diese Kraft auf die Fläche einer Elektrode im unbelasteten Zustand bezogen wird:

$$p_{\text{el}} = \frac{F_z}{A_0} = \varepsilon z_0 \frac{1}{(z_0 - \Delta z)^3} U^2 \quad (2.18)$$

Für eine einfache und schnelle Abschätzung der Leerlaufauslenkung eines dielektrischen Elastomeraktors ist diese Gleichung 3. Ordnung unhandlich. Es hat sich im Bereich der elektroaktiven Polymere durchgesetzt, die Dickenänderung Δz des dielektrischen Films im Nenner der Gleichung (2.18) zu vernachlässigen [Car+03; Cho+02; FG08; Kof06; PKJ98].

Die zu erwartenden Deformationen liegen in einem Bereich zwischen 5 % und 20 % der Ruheschichtdicke des Dielektrikums. Durch die Vernachlässigung der Dickenänderung im Nenner der Gleichung (2.18) wird der maximal mögliche elektrostatische Druck deutlich unterschätzt. Jedoch liegt der in Abbildung 2.1 dargestellte Fall eines völlig frei beweglichen dielektrischen Films nur in sehr wenigen, speziellen Fällen vor. In der Regel ist der aktive Bereich der dielektrischen Elastomeraktoren von passivem Material umgeben, der die Bewegung bis zu einem gewissen Maß behindert. Die Praxis zeigt, dass die Vernachlässigung von Δz in Gleichung (2.18) zum Zweck der Abschätzung zulässig ist. Der maximal entstehende elektrostatische Druck p_{el} hängt damit primär von der

Permittivität ϵ_r des Dielektrikums und dem Quadrat der an die Elektroden angelegten elektrischen Feldstärke U/z_0 ab.

$$p_{\text{el}} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U^2}{z_0^2} \quad (2.19)$$

Aufgrund der oben genannten idealen Voraussetzungen eines isotropen dielektrischen Films, ideal elastischen Elektroden und völliger seitlicher Bewegungsfreiheit kann das Deformationsverhalten des dielektrischen Films mit Hilfe des uniaxialen Kompressionsmoduls Y_c beschrieben werden. Dieses Modul beschreibt das Verhältnis zwischen der entstehenden Dickenänderung Δz und der verursachenden uniaxialen Druckspannung p :

$$Y_c = \frac{p}{\Delta z} \cdot z_0 \quad (2.20)$$

Damit kann nun ausgehend von der vereinfachten Gleichung (2.19) für den elektrostatischen Druck im Elastomeraktor die Auslenkung des Aktors abgeschätzt werden:

$$\frac{\Delta z}{z_0} = \frac{p_{\text{el}}}{Y_c} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{Y_c} \cdot \frac{U^2}{z_0^2} \quad (2.21)$$

Aus Gleichung (2.21) können die drei wichtigsten Materialeigenschaften für einen leistungsstarken Elastomeraktor direkt abgelesen werden:

- **Elastizität:** Je nachgiebiger das Material, desto geringere elektrostatische Drücke müssen erzeugt werden, um den Aktor auf ein gewisses Maß $\Delta z/z_0$ auszulenken. Im Umkehrschluss wird ein Material bei einem gegebenen elektrostatischen Druck bzw. Ansteuerspannung U umso mehr gestaucht, desto weicher es ist.
- **Permittivität:** Die Auslenkung eines Aktors ist direkt proportional zur relativen Permittivität des verwendeten Dielektrikums.
- **Durchbruchfestigkeit:** Die sich aus der angelegten Spannung U und der Ausgangsschichtdicke z_0 ergebende angelegte Feldstärke beeinflusst die entstehende Deformation mit der zweiten Potenz. Die applizierbare Feldstärke ist durch die Durchbruchfestigkeit des Materials fest vorgegeben. Eine Überschreitung führt zum elektrischen Durchbruch und in der Regel zur sofortigen Zerstörung des Aktors.

Die vierte wichtige Größe ist die Ausgangsschichtdicke z_0 . Da die obere Grenze der applizierten Feldstärke U/z wie erwähnt durch die Durchbruchfeldstärke begrenzt ist, bestimmt die Schichtdicke die Ansteuerspannung U , die für den Betrieb des Aktors notwendig ist. Ohne mechanische Vorspannung sind Durchbruchfeldstärken zwischen 20 V/ μm und 50 V/ μm für Elastomere typisch [Kof01; Mat+08a].

Die vier Größen Schichtdicke, Elastizität, Durchbruchfeldstärke und Permittivität bestimmen also maßgeblich die Leistungsfähigkeit dielektrischer Elastomeraktoren. In den folgenden Abschnitten wird dargestellt, welche Randbedingungen für diese vier Größen bei den hier verwendeten Elastomeraktoren gelten und welche Maßnahmen im Rahmen der Arbeit unternommen wurden, um diese Parameter zu verändern und damit die Leistungsfähigkeit der Aktoren zu erhöhen.

2.3 Dielektrische Elastomerstapelaktoren

Die Gleichung (2.21) aus dem vorangegangenen Abschnitt macht eine für den Betrieb dielektrischer Elastomeraktoren sehr wichtige Eigenschaft deutlich: Je geringer die Schichtdicke z_0 ist, desto kleiner kann die Betriebsspannung der Aktoren sein. Gleichzeitig schrumpft jedoch mit der Schichtdicke auch die Deformationsamplitude Δz . Ein Ausweg aus diesem Dilemma zeigten bereits PELRINE u. a. in einer frühen Veröffentlichung aus dem Jahr 1997 auf: Analog zu piezoelektrischen Stapelaktoren können einzelne Schichten aufeinander gestapelt werden [Pel+97]. Diese Schichten sind elektrisch parallel geschaltet, d. h. über jeder Schicht liegt trotz geringer Betriebsspannung U eine relativ hohe Feldstärke E an. Mechanisch sind die Aktorschichten dagegen seriell geschaltet, die Einzeldeformationen addieren sich.

Der von PELRINE u. a. demonstrierte Stapel besaß vier Schichten von Dielektrikum und Elektrode und wurde manuell hergestellt [Pel+97]. Seitdem wurde diese Idee mehrfach aufgegriffen und weiterentwickelt.

Eine große Herausforderung bei der Herstellung eines Stapelaktors ist bei allen Verfahren, das fehler- und verunreinigungsfreie Aufeinandersetzen einer Vielzahl dielektrischer Schichten und Elektroden. CARPI u. a. identifizierten das Aufschneiden eines Schlauches als eine Lösung für dieses Problem. Abbildung 2.3 zeigt das Herstellungsprinzip: Das Dielektrikum liegt in Form eines Silikonschlauches vor. Dieser Schlauch wird spiralförmig aufgeschnitten, anschließend werden die Schnittflächen mit leitfähigem Material bedeckt, die fortan als Elektroden dienen [Car+05]. Damit es nicht direkt zu einem elektrischen Kurzschluss kommt, wird anschließend zwischen die Elektroden eine weitere nichtbeschichtete Helix als Isolator eingesetzt [CR04]. Bei statischer Anregung erzeugen diese Aktoren eine Kontraktion um 5 % bei einer Feldstärke von $14 \text{ V}/\mu\text{m}$ [Car+05].

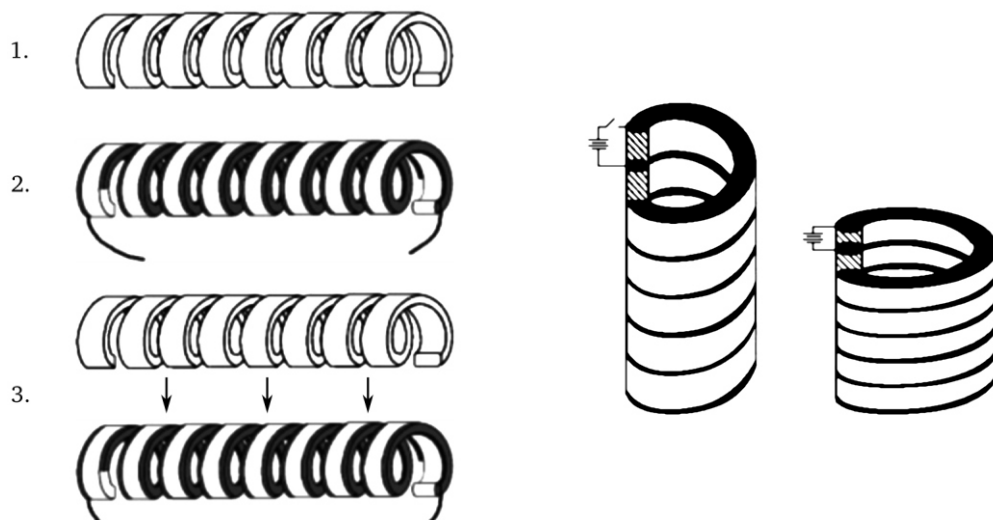


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Helix-Aktors von CARPI u. a. [Car+05].

Das größte Problem in der Herstellung der Spiralaktoren sieht CARPI in der Gewährleistung einer geringen Schichtdicke. Mit Hilfe des von ihm entwickelten Schneidverfahrens sei eine reproduzierbare Aktorqualität nur mit Schichtdicken oberhalb von $500 \mu\text{m}$ möglich [Car+05]. Einen wesentlichen Vorteil sieht er jedoch in der einfachen Kontaktierung, da es lediglich zwei Elektrodenflächen gibt. Diesen Vorteil nutzen CARPI und ROSSI auch für einen Stapelaktor, für den ein langer, schmaler Silikonstreifen beidseitig mit leitfähigem Material beschichtet und dann gefaltet wird [CR06]. Diese Aktoren erreichen mit einer Schichtdicke zwischen $500 \mu\text{m}$ und $800 \mu\text{m}$ eine Deformation von 8 % bei einer Feldstärke von $13 \text{ V}/\mu\text{m}$ [CSR07].

Wie später in Abschnitt 3.2 noch gezeigt wird, hat die Leitfähigkeit der Elektroden einen erheblichen Einfluss auf die Dynamik der Aktoren. Der Spiralaktor sowie der gefaltete Aktor besitzen eine niederohmige Zuleitung lediglich bis an die Enden des Aktors. Aufgrund der enormen Länge der gewundenen Flächen von ca. 1,5 m müssen die Elektroden eine sehr hohe Leitfähigkeit aufweisen, um den Aktor dynamisch anregen zu können. Unter Verwendung von Graphit oder Ruß ist dies nur mit verhältnismäßig dicken Elektroden möglich. Anderenfalls sind nur quasi-statische Anregungen möglich.

Ein Ausweg ist, die einzelnen Schichten des Stapels parallel zu kontaktieren. CHUC u. a. präsentierten im Jahr 2007 ein automatisiertes Verfahren, das im Prinzip auf der Faltung nach CARPI beruht [Chu+07]. Jedoch werden die dielektrischen Filme hier jeweils nur einmal gefaltet. Zum Aufbau des Stapels wird dann eine Vielzahl von Einzellagen aufeinander gesetzt, siehe Abbildung 2.4.

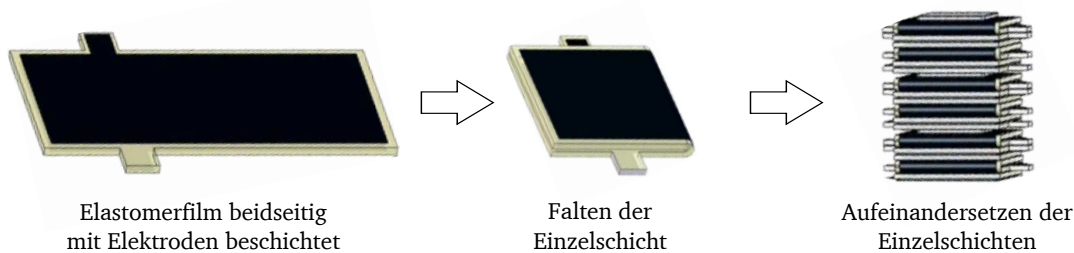


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Stapelaktors nach CHUC u. a. [Chu+07].

Die Stapelaktoren von CARPI u. a. und CHUC u. a. sind nicht dafür ausgelegt, Zugkräfte aufzunehmen. Da die elektrostatischen Kräfte nur von Außenseite zu Außenseite benachbarter Elektroden reichen, besteht die Gefahr einer Delamination der Stapelaktoren, da innerhalb der Elektroden keine Kräfte herrschen. KOVACS und DÜRING entwickelten eine Technik zur Herstellung extrem dünner Rußschichten. Damit hergestellte Elektroden sollen aus lediglich einer Schicht von Primärpartikeln bestehen. Eine solche Monolage baut elektrostatische Kräfte zu beiden benachbarten Elektroden auf und ist dadurch in der Lage auch Zugkräfte aufzunehmen [KD09].

Den bisher vorgestellten Stapelaktorkonzepten von CARPI u. a., CHUC u. a. sowie KOVACS und DÜRING ist gemeinsam, dass sie als Stellantriebe mit großen Auslenkungen und für die Erzeugung hoher Kräfte ausgelegt sind. Die Querschnittsflächen der aktiven Elektrodenbereiche liegen im Quadratzentimeterbereich, die Länge der drei Varianten beträgt bis zu 10 cm.

Die Stapelaktoren, die im Rahmen dieser Arbeit benutzt werden, befinden sich dagegen in einem ganz anderen Größen- und Kräftebereich. Das Verfahren ihrer Herstellung wurde von JUNGMANN entwickelt [Jun04]. Ziel war es damals, taktile Displays mit Festkörperaktoren zu betreiben, die leicht, billig sowie hochdynamisch sind und deren laterale Auflösung von 2 mm an die Grenze der menschlichen Wahrnehmungsschwelle heranreicht [JMS04; JS02].

Die von JUNGMANN entwickelte Technologie zur Herstellung gestapelter dielektrischer Elastomeraktoren erfolgt in einem vollautomatisierten Prozess. Der Ablauf kann in drei wesentliche Schritte gegliedert werden, die sich für jede Schicht wiederholen, siehe Abbildung 2.5.

Herstellen der dielektrischen Schicht im Schleuderverfahren

Die beiden Elastomerprecursorkomponenten werden in getrennten Kartuschen vorgehalten, die Mischung erfolgt erst direkt beim Dosieren auf den Schleuderteller. Das verwendete Elastosil®

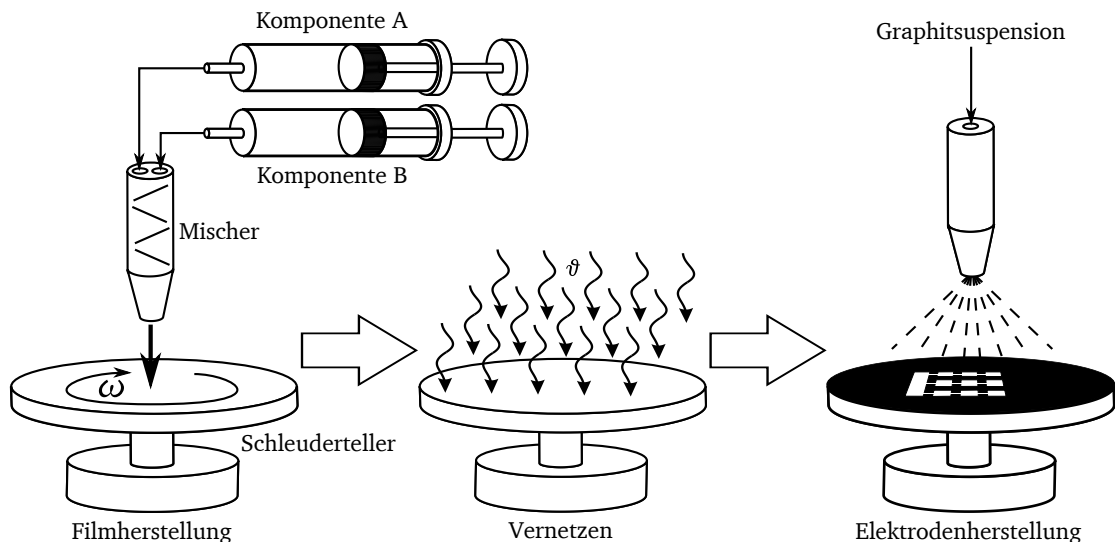


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der drei Prozessschritte zur Herstellung von dielektrischen Stapelaktoren.

P7670 von Wacker Silicones ist bisher das einzige kommerziell erhältliche Silikon, das die verschiedenen Anforderungen des Herstellungsprozesses und der späteren Verwendung ausreichend gut erfüllt:

- **Viskosität:** Damit im folgenden Schleuderprozess eine ausreichend dünne Schichtdicke erreicht werden kann, darf die Viskosität der unvernetzten Elastomervorstufen nicht zu hoch sein. Die Viskosität wird vom Hersteller mit 1800 mPa s angegeben. [Wac]
- **Vernetzungsdauer:** Die katalytisch unterstützte Additionsreaktion, die zur Vernetzung führt, kann durch zugeführte Wärmeenergie beschleunigt werden. Bei Temperaturen über 200 °C vernetzen dünne Elastosilfilme in weniger als einer Minute.
- **Topfzeit:** Während der einzelnen Prozesswiederholungen darf das Elastomer nicht schon im Dosierer vollständig vernetzen. Die Topfzeit beträgt bei Raumtemperatur etwa 20 min.
- **Elastizität:** Um im Aktorbetrieb hohe Auslenkungen zu erreichen, muss das Elastomermaterial weich sein. Der uniaxiale Kompressionsmodul liegt bei 180 kPa.
- **Permittivität:** Gemäß Gleichung (2.21) steigt die Auslenkung dielektrischer Elastomeraktoren linear mit der relativen Permittivität des Dielektrikums. Elastosil P7670 besitzt eine Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 3$.

Die Schleudereinheit ist für Schleuderteller mit einem maximalen Durchmesser von 100 mm ausgelegt. Praktisch alle Aktoren für die vorliegende Arbeit wurden auf Tellern mit einem Durchmesser von 40 mm hergestellt. Die wesentlichen Parameter für dünne homogene Schichten sind die Beschleunigung $\dot{\omega}$ und die Enddrehzahl ω des Schleudertellers.

Heizen des unvernetzten Films

Wie oben bereits erwähnt, kann der Vernetzungsprozess des Elastosils durch Zufuhr von Wärme erheblich beschleunigt werden. Aufgrund der thermischen Kapazität des Schleudertellers dauert es einige Minuten, bis der Film die oben genannte Temperatur $\vartheta = 200$ °C erreicht hat und vollständig vernetzt ist.

Herstellen der Elektroden

Die Beschreibung des Funktionsprinzips dielektrischer Elastomeraktoren in Abschnitt 2.2 macht deutlich, dass diese Aktoren ihr volles Leistungspotenzial nur mit Elektroden erreichen können, deren Leitfähigkeit auch unter lateraler Dehnung erhalten bleibt. JUNGSMANN entwickelte daher bereits einen Sprühprozess um Graphitpulver durch eine Schattenmaske auf den dielektrischen Film aufzusprühen [Jun04]. Schon mit dieser Technik war es möglich, Elektrodenstrukturen mit einer Strukturbreite unterhalb 1 mm zu fertigen, siehe Abbildung 2.6

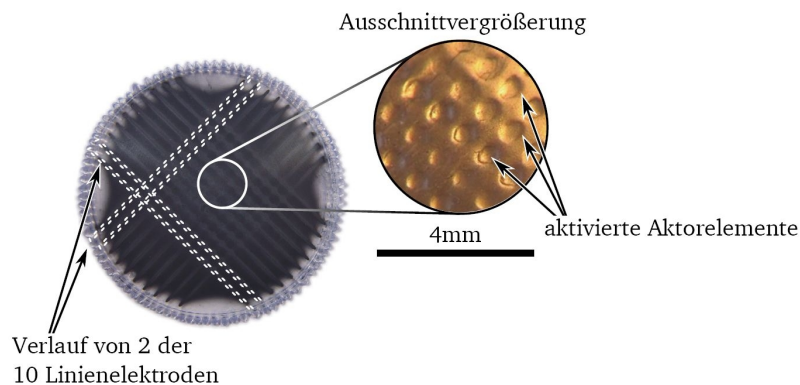


Abbildung 2.6: Dielektrischer Elastomerstapelaktor mit hochauflösender Elektrodenstruktur.

Die drei in Abbildung 2.5 dargestellten Schritte werden zum Bau eines Stapelaktors mit n Schichten n -mal wiederholt. Zwei übereinander liegende Elektroden werden jeweils so hergestellt, dass Zuleitungen für Elektroden und Gegenelektroden entstehen, siehe Abbildung 2.7. Dies kann durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Masken oder durch Verdrehen des Schleudertellers bei jeder zweiten Schicht geschehen.

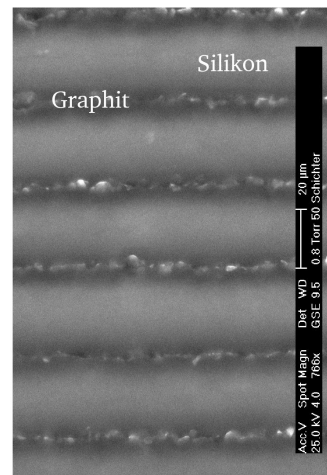
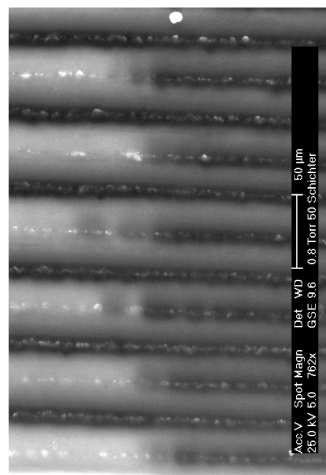
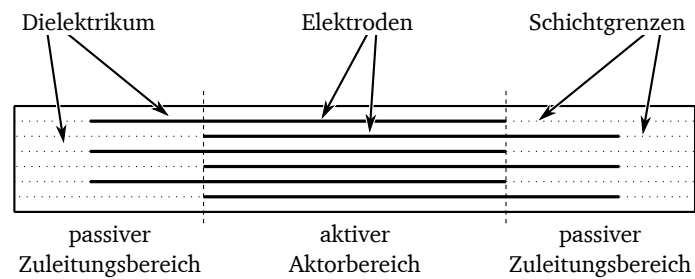


Abbildung 2.7: Querschnitt durch einen Elastomerstapelaktor. Zu sehen sind der aktive Aktorbereich mit übereinanderliegenden Elektroden und die Zuleitungen.



3 Technologie dielektrischer Elastomerstapelaktoren

Einzelne Aspekte der übersichtsartigen Darstellung dielektrischer Elastomeraktoren im vorangegangenen Kapitel werden in diesem Kapitel wieder aufgegriffen und vertieft. Die intensive Arbeit an der Weiterentwicklung der Technologie hat gezeigt, dass Materialien und Herstellungsverfahren nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Der erste Abschnitt widmet sich daher zunächst dem Dielektrikum. Die dielektrischen Eigenschaften dünner Schichten aus geeigneten Elastomeren werden in Abschnitt 3.1.1 untersucht. Diese Untersuchungen werden speziell vor dem Hintergrund der Aktorfertigung durchgeführt. So wird zum Beispiel gezeigt, welchen Einfluss das beschleunigte Vernetzen auf die Eigenschaften des Elastomers hat. Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Elastomers werden in 3.1.2 diskutiert.

Abschnitt 3.2 zeigt, welche Möglichkeiten zur Elektrodenherstellung bestehen und welche Materialien in Frage kommen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Definition einer minimalen Leitfähigkeit der Elektroden, die für den Aktorbetrieb zulässig ist.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Darstellung der überarbeiteten Herstellungstechnologie in Abschnitt 3.3. Hier werden die Ergebnisse von Untersuchungen zur Qualität der geschleuderten Schichten gezeigt sowie welche Veränderungen in der Elektrodenherstellung notwendig waren, um eine verlässliche Herstellung zu gewährleisten.

3.1 Dielektrikum

In den vorangegangenen Ausführungen über dielektrische Aktoren im Allgemeinen und dielektrische Stapelaktoren im Speziellen wurde deutlich, dass die Leistungsfähigkeit von Elastomeraktoren durch die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des eingesetzten Dielektrikums maßgeblich bestimmt werden. Obschon nunmehr seit mehr als 10 Jahren auf dem Gebiet der Elastomeraktoren geforscht und gearbeitet wird, ist die Zahl der als Dielektrikum eingesetzten Elastomermaterialien überschaubar. Hauptsächlich werden Materialien der folgenden Materialfamilien eingesetzt:

- Polyacryl
- Polysiloxan
- Polyurethan
- Polystyrol/Polystyrene

Während es von Polyacryl praktisch nur einen benutzten Vertreter gibt, werden eine Reihe kommerziell erhältlicher Silikone für dielektrische Elastomeraktoren verwendet. Bei Polyurethanen und Polystyrol werden im Gegensatz hierzu praktisch keine kommerziellen Materialien verwendet, vielmehr werden hier Muster aus den eigenen Laboren der jeweiligen Forschergruppen verwendet. Im folgenden werden die Vertreter der vier verschiedenen Materialfamilien und ihre allgemeinen Eigenschaften vorgestellt, eine Zusammenfassung der Materialeigenschaften zeigt Tabelle 3.1.

Polyacryl

Das bisher meist benutzte Material in dielektrischen Elastomeraktoren ist VHB4905[®]/VHB4910[®], das von der Firma 3M als doppelseitiges Klebeband verkauft wird. KORNBLUH u. a. entdeckten die besondere Eignung dieses Materials und benutzten es erstmals um verschiedene Bauformen dielektrischer Elastomeraktoren wie Einzelschicht- und Rollenaktoren zu fertigen [Kor+00]. Durch die hohe Klebekraft auf beiden Seiten lässt es sich auch im gedehnten Zustand leicht auf Rahmen aufziehen und Elektroden können einfach aufgebracht werden.

Die Ausgangsdicke dieses Klebebandes beträgt 0,5 mm (VHB4905) bzw. 1 mm (VHB4910). Um mit geringeren Spannungen arbeiten zu können, wird das Material in der Regel stark planar um mehrere hundert Prozent gedehnt (z.B. [Gis+08; Kof+01; WLD06]). Hierdurch verbessern sich gleichzeitig die elektrischen und mechanischen Eigenschaften für den Aktorbetrieb: Die Durchbruchfeldstärke des VHB-Materials liegt im Ausgangszustand bei 18 V/ μm [Kof+01] und steigt mit zunehmender Vordehnung auf bis zu 240 V/ μm an [Pel+00b]. Dieser Anstieg wird von KOFOD u. a. mit der zunehmenden orthogonalen Ausrichtung der Molekülketten gegenüber dem elektrischen Feld erklärt [Kof+01]. Desweiteren werden die viskosen Eigenschaften wie Dämpfung und Kriechen unter dem Einfluss lateraler Vordehnung vermindert.

Die relative Permittivität beträgt bei den üblichen Aktorfrequenzen $\epsilon_r \approx 5$. Die Literaturwerte zeigen eine verhältnismäßig große Streuung, auf die MCKAY, CALIUS und ANDERSON erst kürzlich wieder hingewiesen haben [MCA09]. Neben den unbekannten Messbedingungen der verschiedenen Arbeitsgruppen gilt eine von WISSLER und MAZZA sowie KOFOD postulierte Änderung der Materialzusammensetzung vor wenigen Jahren [Kof08; WM07] als Hauptursache für die starke Variation der publizierten Messergebnisse. Es darf aber auch nicht unbeachtet bleiben, dass das VHB-Material als Klebeband vertrieben und als solches spezifiziert ist. Die Permittivität spielt für den Hersteller daher wohl nur eine untergeordnete Rolle.

Nachteile dieses Materials sind das ausgeprägte viskoelastische Verhalten, sowie die Notwendigkeit einer passiven Stützstruktur, die die mechanische Vorspannung aufrechterhält.

HA u. a. haben aus diesem Grund eine Materialmodifikation entwickelt: Im vorgedehnten Zustand wird das VHB-Material mit einem zweiten Polymer kombiniert. Dieses *interpenetrierende Netzwerk* (IPN) ist wesentlich starrer als die Polyacrylmatrix des VHB. Ist das interpenetrierende Netzwerk ausgehärtet, bleibt ein großer Teil der Vorspannung auch ohne mechanische Stützstruktur erhalten [Ha+06; Ha+07]. Unter anderem wird dieses Material von KOVACS u. a. benutzt, um Rollenaktoren aufzubauen, die keinerlei mechanische Vorspannung benötigen [Kov+08].

Polydimethylsiloxan

Im Gegensatz zu Polyacryl, dessen praktisch alleiniger Vertreter das VHB[®] ist, werden verschiedene Silikone (Polydimethylsiloxan, PDMS) für die dielektrischen Elastomeraktoren benutzt. Die verwendeten Materialien lassen sich in zwei Gruppen aufteilen.

Die Silikone der ersten Gruppe umfassen kommerzielle Materialien, die allgemein in der Mikrosystemtechnik Verwendung finden und auch für dielektrische Elastomeraktoren benutzt werden. Dies sind insbesondere Silikone der Firma Dow Corning. Zum einen das sehr weiche HS3[®], das z.B. von HEYDT, KORNBLUH, PELRINE, LAU benutzt wurde [Hey+00; Kor+99; Lau+06; PKJ98; Pel+00a; Pel+00b]. Weniger verbreitet sind Nusil CF19-2186[®] und Dow Corning Sylgard 184[®]. Mit ersterem haben PELRINE und JUNG gearbeitet [JKC08; Pel+00b] mit letzterem KOFOD und ASCHWANDEN [ANS08; Kof01]. Die weiteste Verbreitung hat das Dow Corning Sylgard 186[®] erreicht, hiermit arbeiteten bzw. arbeiten z.B. die Arbeitsgruppen von PELRINE, KORNBLUH, LAU, DUBOIS und PIMPIN [Dub+08; Kor+98; Lau+06; Pel+97; Pel+00a; PSK04; Ros+08b].

Zur zweiten Silikongruppe gehören Materialien, die ausschließlich von einer Arbeitsgruppe verwendet werden. CARPI arbeitet mittlerweile fast ausschließlich mit TC-5005 A/B-C[®] (BJB Enterprises Inc.) [CFR06; CMR05; CR06; Car+05; Gal+07]. Das als Dielektrikum verwendete Silikon für die Polypower[®]-Aktoren basiert auf Wacker Elastosil RT625 [Ben+08]. Für die in dieser Arbeit untersuchten und benutzten Elastomerstapelaktoren wird bisher ausschließlich Wacker Elastosil[®] P7670 verwendet [JMS04; LMS09; MLS09; SML05].

Für alle genutzten Silikonmaterialien gilt, dass sie eine verhältnismäßig niedrige relative Permittivität $\epsilon_r = 2,5 \dots 4$ haben. Silikone können sehr weich sein, z.B. besitzt das HS3[®] ein E-Modul $Y = 125 \text{ kPa}$ [KP08]. Gegenüber dem VHB[®] weisen Silikone in der Regel eine geringere Durchbruchfeldstärke zwischen $30 \text{ V}/\mu\text{m}$ und $150 \text{ V}/\mu\text{m}$ auf, Nusil[®] CF16-2186 ist eher als Ausnahme anzusehen. Dafür ist das viskoelastische Verhalten bei Silikonen wesentlich geringer ausgeprägt als bei Polyacryl-Elastomeren. Silikon-Elastomere sind daher wesentlich besser für Betriebsfrequenzen über 100 Hz geeignet [Pel+00b].

Polyurethan

Mit Polyurethanen wurden die allerersten Versuche gemacht, die gezeigt haben, dass mit Elektrostriktion und MAXWELL-Spannung zwei unterschiedliche Ursachen für eine Materialdehnung im elektrischen Feld existieren [Wan+94; Zhe+94]. Unter den Materialien für dielektrische Elastomeraktoren gelten Polyurethane als die Einzigen, die auch einen nennenswerten elektrostriktiven Effekt zeigen [DDT06; Hir+96; Kof01]. Der Elektrostriktion und der MAXWELL-Spannung werden dabei ungefähr die gleichen Anteile zugesprochen [Kof01; Wan+94].

Im Vergleich zu Silikonen und VHB wurden bisher nur wenige Aktoren auf Polyurethanbasis gezeigt. PELRINE, KORNBLOH und SHANKAR verwendeten Deerfield PT6100S um einfache Membranaktoren für Vergleichsmessungen zu bauen [Kor+98; Pel+00a; SGS09]. Einen komplexeren Aufbau mit drei Aktorelementen realisierte CHOI, spezifizierte aber das benutzte Polyurethanmaterial nicht näher [Cho+02]. Den interessantesten Ansatz zeigte Cameron mit einem Faseraktor aus Pellethane[®] 2103-70A (Dow Chemical) [Cam+08].

Polyurethan ist grundsätzlich als Dielektrikum gut geeignet, da es hohe Permittivitäten $\epsilon_r > 5$ besitzen kann, ebenso sind hohe Durchbruchfeldstärken $E_{\text{max}} > 50 \text{ V}/\mu\text{m}$ möglich. Allerdings liegen die Elastizitätsmoduln üblicherweise im Megapascalbereich und damit deutlich höher als bei Silikonen.

Thermoplastisches Elastomergel

Polyacryl, PDMS und Polyurethan sind Homopolymere, die gesamte Molekülkette besteht nur aus einer Sorte von Monomeren. Die Elastizität entsteht durch eine chemische Vernetzung der Polymere an den Seitenketten. Die Formgebung, die während der Vernetzung erfolgt, kann daher nicht mehr rückgängig gemacht werden. Thermoplaste hingegen besitzen die typische Eigenschaft, dass die Formgebung durch Erwärmen reversibel ist und beliebig oft wiederholt werden kann.

Thermoplastische Elastomergele unterscheiden sich in zwei Punkten grundsätzlich von den bisher genannten Polymeren. Es handelt sich um Blockpolymere. Eine schon mehrfach genutzte Variante sind Poly[styrol-*b*-(ethylen-co-butyl)-*b*-styrol]-Blockpolymere (SEBS). Das Blockpolymer besteht aus einem Ethylenbutylen-Copolymer in der Mitte und Polystyrolketten an den beiden Enden. Der mittlere Block ist der elastische, gummiartige Teil des Moleküls, die beiden Enden sind glasartig [SGS07a]. Die Phenolringe des Polystyrolblocks bilden eine physikalische Vernetzung der Polymerketten, die die elastomerartigen Eigenschaften des SEBS-Blockpolymers erklärt. Da es sich um eine

physikalische Vernetzung handelt, ist diese reversibel und kann unter Wärmezufuhr wie bei einem klassischen Thermoplast mehrfach durchgeführt werden.

Der zweite Unterschied zeigt sich im Elastizitätsmodul dieser Polymere. Typische Werte liegen im Bereich zwischen 2 kPa und 160 kPa [SGS07b] und sind damit wesentlich niedriger als die Werte der anderen verwendeten dielektrischen Elastomere, siehe Tabelle 3.1. Dieses extrem niedrige Elastizitätsmodul wird erreicht, indem die Blockpolymere in einem geeigneten Lösungsmittel gequollen werden und damit in ein Gel überführt werden [SGS07a].

Die hohe Elastizität in Verbindung mit einer guten Durchbruchfestigkeit von bis zu 200 V/ μm erlauben Flächendehnungen einschichtiger Aktoren von bis zu 250 % bei einer Feldstärke von lediglich 20 V/ μm [SGS09].

Diese Materialklasse ist im Bereich der dielektrischen Elastomere noch recht neu. SHANKAR, GHOSH und SPONTAK zeigten 2007 die ersten Ergebnisse mit SEBS161 und SEBS217 (GLS Corporation) [SGS07a]. STOYANOV, KOFOD und GERHARD sowie KOLLOSCHKE u. a. haben erste Ergebnisse mit SEBS 500120 und SEBS 500040 (VTC Elastotechnik AB) gezeigt [Kol+09; SKG08].

Aufgrund des extrem niedrigen Elastizitätsmoduls und der Möglichkeit einer reversiblen Formgebung kann diesen Materialien ein hohes Potenzial im Bereich der dielektrischen Elastomeraktoren zugesprochen werden.

Tabelle 3.1: Übersicht über die Materialeigenschaften von Elastomeren, die für dielektrische Elastomeraktoren genutzt werden [Kof+01; KP08; Kor+98; Kor+00; Pel+02; SGS07b; SGS09]

Name	Art	Dielektrizitätszahl ϵ_r	E-Modul [Y] = MPa	Durchbruchfeldstärke [E_{\max}] = V/ μm
VHB4910	PAE	4,7	3,0	18 ^a – 218 ^b
CF19-2186	PDMS	2,8	1,0	235
HS3	PDMS	2,8	0,13	72
Sylgard 186	PDMS	2,8	0,7	144
Elastosil P7670	PDMS	3,0	0,15 ^c	30
PT6100S	PUR	7,0	17	160
SEBS217	SEBS	n. b.	0,13	195

^a ungedehnt

^b bei 25-facher Flächendehnung

^c uniaxiales Kompressionsmodul

Ergänzend zu dieser komparativen Darstellung der allgemein eingesetzten Materialien werden im Folgenden die Materialeigenschaften zweier ausgewählter Silikone gesondert dargestellt und diskutiert.

3.1.1 Materialeigenschaften von Elastosil® P7670

Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Dielektrikums sind die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Betriebsverhalten der Elastomeraktoren. Gleichzeitig muss mit einer Beeinflussung dieser Parameter durch die Bedingungen des Herstellungsprozesses gerechnet werden.

Das in dieser Arbeit als Standardmaterial verwendete Elastosil[®] P7670 wurde für den Einsatz in der Prothetik entwickelt und spezifiziert [Wac]. Außer Dichte und Viskosität sind keine relevanten Daten im Datenblatt dokumentiert. Es ist daher notwendig, die Materialparameter unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses zu bestimmen.

In einer Materialrecherche wurden neben dem Elastosil[®] P7670 zwei weitere Silikone identifiziert, deren Materialeigenschaften eine Eignung für dielektrische Elastomerstapelaktoren vermuten lassen. Hauptgrund für die geringe Auswahl an alternativen Materialien ist die Forderung nach einer geringen Härte und einer kurzen Vernetzungszeit. MED-4905 von NuSil ist wie Elastosil[®] P7670 ein zweikomponentiges additionsvernetzendes Silikon. RTV 410 von GE Silicones ist ein polykondensierendes Silikon aus ebenfalls zwei Komponenten. Die Shore A Härte von Elastosil[®] P7670 und MED-4905 beträgt laut Datenblatt 7, RTV 410 besitzt eine Shore A Härte von 10.

Dennoch können die beiden alternativen Materialien nur als Kompromiss angesehen werden. MED-4905 besitzt eine derart hohe Viskosität, dass ein Verarbeiten im Schleuderprozess nicht möglich ist. Die Komponenten des RTV 410 sind im Verhältnis 40:1 zu mischen. Das gleichmäßige Einmischen und Dosieren der geringen Komponentenmenge zur Herstellung einer jeden einzelnen Schicht ist daher sehr schwierig. Trotz dieser Nachteile sind einige der Eigenschaften so interessant, dass die folgenden Untersuchungen sowohl für Elastosil[®] P7670 als auch für RTV 410 durchgeführt wurden.

Permittivität

Von VHB 4910 ist bekannt, dass die Permittivität eine starke Dehnungsabhängigkeit aufweist [WM07]. Elastosil[®] P7670 entstammt zwar einer ganz anderen Materialfamilie, es soll dennoch ausgeschlossen werden, dass eine Herabsetzung der Permittivität durch eine mechanische Belastung das Aktorverhalten negativ beeinflusst.

Die Permittivität hängt mit der Polarisierbarkeit des Materials zusammen. Durch die Filmherstellung mittels des in Abschnitt 2.3 vorgestellten Schleuderverfahrens ist damit zu rechnen, dass die Molekülketten in der dielektrischen Schicht eine radiale Vorzugsrichtung aufweisen. Je dünner die Schicht geschleudert wird, desto höher ist die Schleuderdrehzahl und desto höhere Kräfte wirken auf den unvernetzten Film während des Prozesses. Die Permittivität wird daher in Abhängigkeit der Schichtdicke untersucht.

Der nachfolgende Heizschritt (siehe Abbildung 2.5) ist notwendig, um die Prozesszeit möglichst kurz zu halten. Daher werden hohe Vernetzungstemperaturen angestrebt. Die eingebrachte thermische Energie darf die Materialeigenschaften aber nicht nachteilig beeinflussen.

Durchbruchfeldstärke

Dielektrische Elastomeraktoren werden bevorzugt mit einer möglichst hohen elektrischen Feldstärke betrieben. Da ein Überschreiten eine unmittelbare, nichtreversible Zerstörung des Aktors zur Folge hat, muss diese kritische Größe und mögliche Einflussparameter hierauf bekannt sein.

Die am einfachsten zu erklärende und offensichtlichste Ursache ist der *elektromechanische Durchbruch*, der direkt aus dem Funktionsprinzip (siehe Kap 2.2) der Elastomeraktoren abgeleitet werden kann. Der elektrostatische Druck staucht das dielektrische Material zwischen den Elektroden soweit zusammen, bis die Materialspannung und der elektrostatische Druck gerade im Gleichgewicht stehen. Während der elektrostatische Druck reziprok vom Elektrodenabstand abhängt, wächst die mechanische Spannung zunächst linear mit der Deformation.

Aus den Materialparametern Permittivität und Elastizitätsmodul kann eine maximale Feldstärke abgeschätzt werden, mit der dielektrische Elastomeraktoren eines bestimmten Materials beaufschlagt werden dürfen. Im Gleichgewichtszustand sind MAXWELL-Spannung aus Gleichung (2.18) und die Materialspannung aus Gleichung (2.20) gerade gleich groß und es gilt:

$$\frac{\Delta z}{z_0} Y_c = \varepsilon_r \varepsilon_0 z_0 \frac{1}{(z_0 - \Delta z)^3} U^2 \quad (3.1)$$

Wird diese Gleichung nach U aufgelöst, so kann man erkennen, dass die Betriebsspannung U für eine bestimmte Deformation Δz ein Maximum aufweist. Durch Differenzieren nach Δz und Nullsetzen ist das Maximum an der Stelle

$$U(\Delta z) = U_{\max} \quad \text{für} \quad \Delta z_{\max} = \frac{z_0}{4} \quad (3.2)$$

zu finden. Für größere Deformationen wird sich also kein stabiles Gleichgewicht zwischen MAXWELL-Spannung und Materialspannung einstellen. Setzt man diese maximale Spannung und die kritische Deformation Δz_{\max} in Beziehung zueinander, so erhält man die Feldstärke $E_{\max, \text{mech}}$, für die der Elastomeraktor elektromechanisch instabil und dadurch zerstört wird:

$$E_{\max, \text{mech}} = \frac{U_{\max}}{\Delta z_{\max}} = \frac{1}{4} \sqrt{3 \frac{Y_c}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} \quad (3.3)$$

Für Aktoren aus Elastosil[®] P7670 gilt daher, dass sie aufgrund der mechanischen Eigenschaften mit nicht mehr als 46 V/ μm angesteuert werden können. Die hohen Feldstärken von VHB4905, wie sie in Tabelle 3.1 gezeigt sind, lassen sich mit Gleichung (3.3) nicht erklären, da für die hohen Dehnungen, die in Aktoren aus VHB4910 auftreten, das Elastizitätsmodul nicht mehr als konstant angesehen werden kann.

Für höhere Feldstärken als $E_{\max, \text{mech}}$ werden sich die Elektroden also ungehemmt aufeinander zu bewegen. Da Elastomeraktoren gewöhnlich mit einer Spannungsquelle betrieben werden, steigt die Feldstärke immer weiter an und es wird zum klassischen elektrischen Durchschlag kommen.

Als *elektrischer Durchschlag* wird der Moment bezeichnet, in dem der in einem dielektrischen Material fließende, zunächst vernachlässigbar kleine Strom plötzlich extrem ansteigt. Dieser plötzliche Anstieg kann verschiedene Ursachen haben, die aber schließlich alle in einer thermischen Zerstörung münden [Kao04].

Für den Anstieg des fließenden Stromes gibt es verschiedene Erklärungsmodelle. Die ersten freien Ladungsträger eines *elektrisch induzierten Durchschlags* entstammen den Elektroden und dringen von dort in das dielektrische Material ein. Nach KAO können nun Bereiche entstehen, in denen das Material eine geringere Dichte aufweist. In diesen Bereichen haben Elektronen eine längere freie Weglänge und können durch das angelegte elektrische Feld so stark beschleunigt werden, dass weitere freie Elektronen durch Stoßionisation erzeugt werden können [Kao84]. Je dicker die Materialprobe ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass solche Ereignisse auftreten. Daher zeigen viele Materialien eine mit wachsender Probendicke abnehmende Durchbruchfestigkeit.

Je mehr Ladungsträger im dielektrischen Material entstehen und sich dort bewegen, desto mehr erwärmt sich das Material und unterstützt die zweite Art des elektrischen Durchschlags, den *thermisch induzierten Durchschlag*. Wie schnell sich das Material erwärmt, hängt von der spezifischen Wärmekapazität C_v , der erzeugten Wärme und der durch das Material abgeführten Wärme ab:

$$C_v \frac{dT}{dt} - \text{div} (K_t \text{grad} T) = \sigma E^2 \quad (3.4)$$

Die erzeugte Joule'sche Wärme hängt vom angelegten Feld E und der elektrischen Leitfähigkeit σ des Materials ab. Die abgeführte Wärmemenge ist durch die thermische Leitfähigkeit K_t bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit setzt sich bei einem angelegten Wechselfeld aus der Gleichspannungsleitfähigkeit und der Leitfähigkeit durch Polarisationsverluste $\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'$ zusammen, wobei ε_r' den Imaginärteil der komplexen Permittivität darstellt. Daher weisen dielektrische Materialien höhere Durchbruchfestigkeiten für Gleichspannung als für Wechselspannung auf.

Aufgrund der oben genannten Punkte wird die Durchbruchfestigkeit bezüglich der folgenden Parameter untersucht:

- Frequenz
- Schichtdicke
- laterale Dehnung

3.1.1.1 Bestimmung der Materialparameter

Die Messverfahren zur Bestimmung der Permittivität und elektrischen Durchschlagfestigkeit sollen sich an standardisierten Messverfahren orientieren. Da die Prüflinge aber wie oben dargestellt sowohl in Herstellung als auch Geometrie den Stapelaktoren entsprechen sollen, kann insbesondere für die Durchbruchfeldstärke auf keine standardisierten Messplätze zurückgegriffen werden.

Um ein elektrisches Feld senkrecht zur Filmoberfläche anlegen zu können, müssen die Filme für die Messungen mit Elektroden versehen werden. Die Handhabung von Elastomerfilmen mit Dicken von 20 μm bedarf hoher Sorgfalt und Erfahrung. Da die Filme im Schleuderverfahren auf einem Aluminiumteller hergestellt werden, kann dieser direkt als eine Elektrode verwendet werden. Für die meisten Parameter, nicht aber zur Untersuchung der Dehnung, vereinfacht dies die Handhabung der Messobjekte deutlich. Insbesondere bei der Messung der Permittivität ist es darüberhinaus wichtig, dass zwischen Messelektroden und dielektrischem Film kein Lufteinschluss entsteht. Als Material für die Gegenelektrode wird daher leitfähiger Lack gewählt.

Mit Hilfe der Formel für einen Plattenkondensator kann nach Messen der Filmdicke z_0 und der Fläche A der Gegenelektrode sowie der Kapazität C die relative Permittivitätszahl ε_r berechnet werden:

$$\varepsilon_r = C \frac{z_0}{A} \quad (3.5)$$

Für die Untersuchung des Einflusses einer lateralen Dehnung des Polymerfilms auf die Permittivität ist allerdings ein höherer Aufwand notwendig.

Filme mit einer Dicke unterhalb 100 μm können ohne Substrat nicht zerstörungsfrei manuell gehandhabt werden und bedürfen eines wesentlich höheren Präparationsaufwandes. Für die Untersuchung der mechanischen Dehnung auf die elektrischen Parameter ist daher ein höherer Vorbereitungsaufwand notwendig. Abbildung 3.1 zeigt die notwendigen Schritte. Der Elastomerfilm wird nicht wie bei den anderen Messungen direkt auf dem Schleuderteller erzeugt. Eine Transferfolie bedeckt den Schleuderteller auf den zunächst ein weiterer Film aus Photoresist MA P 1240 aufgebracht und ausgehärtet wird. Erst danach wird der zu untersuchende Silikonfilm in der gewünschten Dicke aufgeschleudert.

Aufgrund der Polymerfolie kann der Schichtverbund nach der Elastomerfilmherstellung leicht vom Schleuderteller entfernt werden und in eine Spannvorrichtung eingesetzt werden. Nach dem Einspannen wird mit Aceton die Photoresistschicht entfernt, wobei gleichzeitig auch die Polymerfolie

zum Teil aufgelöst und vollständig entfernt wird. Nach dieser Acetonspülung befindet sich der dünne Silikonfilm freihängend in der Spannvorrichtung und kann auf das gewünschte Maß gedehnt werden.

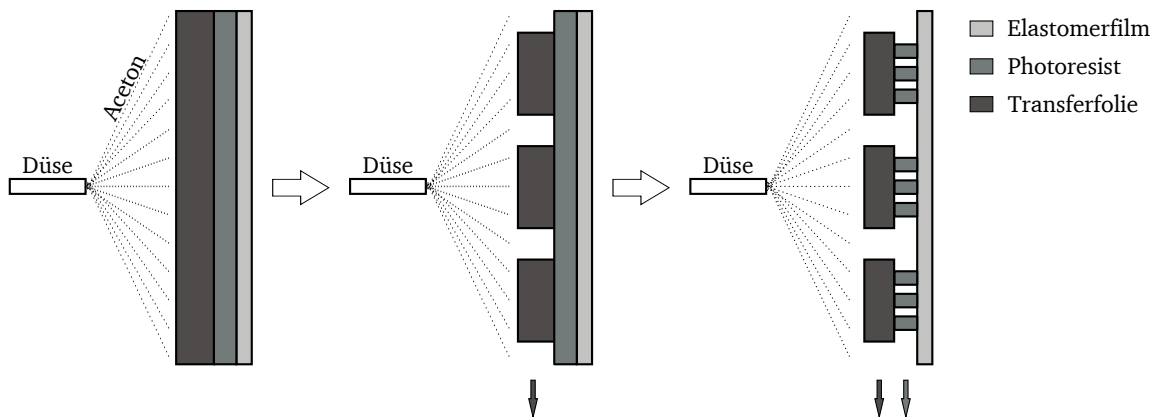


Abbildung 3.1: Filmpräparation zur Untersuchung des Dehnungseinflusses.

Zur Ermittlung der Durchbruchfeldstärke wird an die zu prüfende Probe eine Spannung angelegt und während einer bestimmten Zeit immer weiter erhöht. Dieses Verfahren orientiert sich an der DIN EN 60243. [DIN98; DIN01]. In dieser Norm sind zwei unterschiedliche Verläufe der Feldstärke vorgegeben, siehe Abbildung 3.2. Für Kurzzeitprüfungen wird die Feldstärke rampenförmig mit einer Steigung von z.B. 500 V/s erhöht. Für die Bestimmung der Durchschlagfestigkeit wird eine Feldstärke über einen Zeitraum von 20 s konstant gehalten und dann sprungartig erhöht. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird die zweite Variante gewählt.

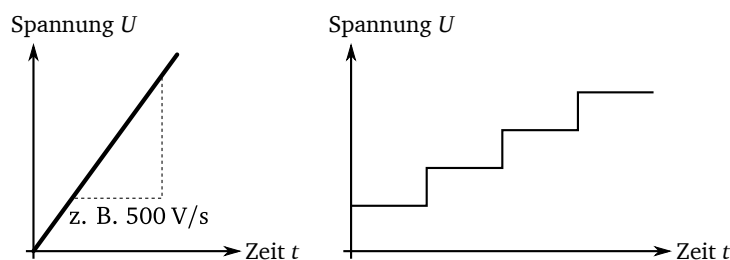


Abbildung 3.2: Zeitliche Verläufe der Feldstärke während der Durchbruchfeldstärkemessung.

3.1.1.2 Einfluss der Vernetzungstemperatur

Abbildung 3.3 zeigt die Abhängigkeit der relativen Permittivität ϵ_r und der Durchbruchfeldstärke E_{\max} von der Vernetzungstemperatur ϑ . Während die Temperatur keinerlei Einfluss auf die Permittivität des Materials hat, verändert sich die Durchbruchfeldstärke sehr stark.

Im Bereich von Raumtemperatur bis 150 °C hat die Temperatur einen positiven Einfluss auf die elektrische Durchschlagfestigkeit des Silikons. Die maximal erreichbare Durchbruchfeldstärke wird bei einer Vernetzungstemperatur $\vartheta = 150$ °C erreicht. Für noch höhere Temperaturen sinkt die maximal an das Elastomer anlegbare Feldstärke wieder leicht, verbleibt jedoch deutlich über 30 V/ μm .

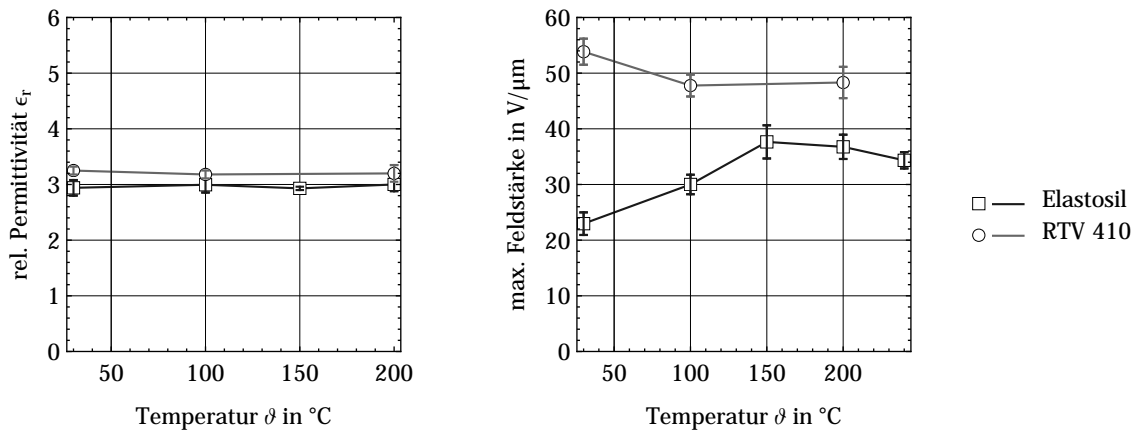


Abbildung 3.3: Einfluss der Temperatur.

Dagegen wird die Durchbruchfeldstärke von RTV 410 durch höhere Vernetzungstemperaturen deutlich geschwächt. Da nur mit höheren Temperaturen die Taktzeit der Aktorherstellung kürzer 10 min gehalten werden, ist dies trotz der hohen Werte ein deutlicher Nachteil von RTV 410.

Falls nicht anders beschrieben, sind alle nachfolgenden Untersuchungen an Proben durchgeführt, die bei $\vartheta = 100$ °C vernetzt wurden.

3.1.1.3 Einfluss der Frequenz

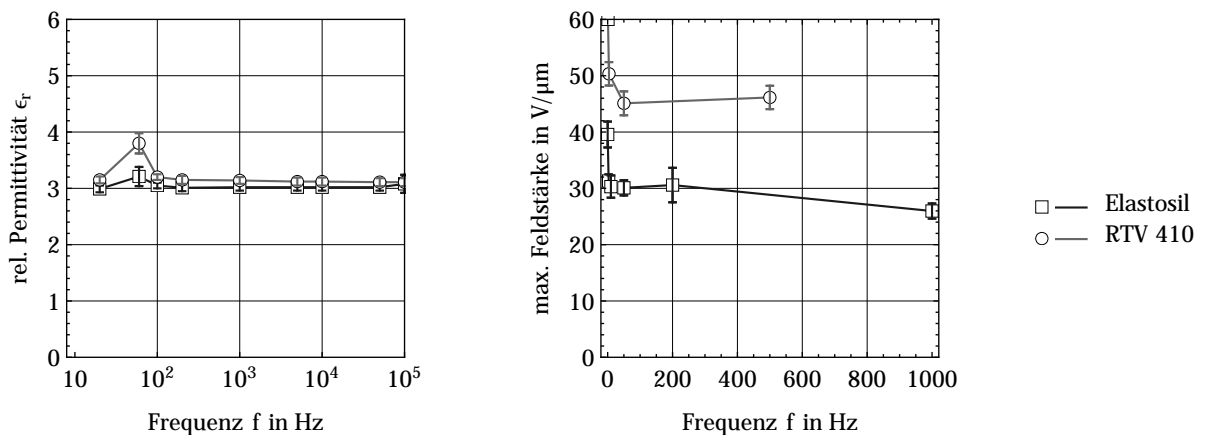


Abbildung 3.4: Einfluss der Frequenz.

Abbildung 3.4 zeigt die Durchbruchfeldstärke und die relative Permittivität in Abhängigkeit der Betriebsfrequenz im Bereich zwischen 20 Hz und bis zu 100 kHz. Die Erhöhung im Bereich um die Netzfrequenz muss als Artefakt angesehen werden, dies zeigt sich auch im relativ großen Vertrauensintervall des Messpunktes. Abgesehen davon, zeigt sich keine Frequenzabhängigkeit. Im Rahmen der Messunsicherheit kann für Elastosil® P7670 von einer relativen Permittivität $\epsilon_r = 3$ ausgegangen werden.

Die in der Norm DIN EN 60243 Teil 1 und Teil 2 [DIN98; DIN01] beschriebene höhere Durchbruchfeldstärke bei Belastung mit Gleichspannung zeigt sich auch in diesen Messungen. Im Gegensatz

zur Messung der relativen Permittivität konnten diese Messungen aufgrund der begrenzten Bandbreite der Hochspannungsverstärker vom quasistatischen Bereich nur bis zu maximal 1 kHz aufgenommen werden.

Für die Frequenzen, in denen die Elastomeraktoren betrieben werden, kann von einer Durchbruchfeldstärke $E_{\max} = 30 \text{ V}/\mu\text{m}$ für das Elastosil® P7670 ausgegangen werden. Für Gleichspannungen weisen diese Messungen auf einen höheren Wert von $E_{\max, \text{DC}} = 40 \text{ V}/\mu\text{m}$ hin. RTV 410 zeigt prinzipiell ähnliche Eigenschaften, jedoch auf dem schon bekannten höheren Niveau.

3.1.1.4 Einfluss der lateralen Dehnung

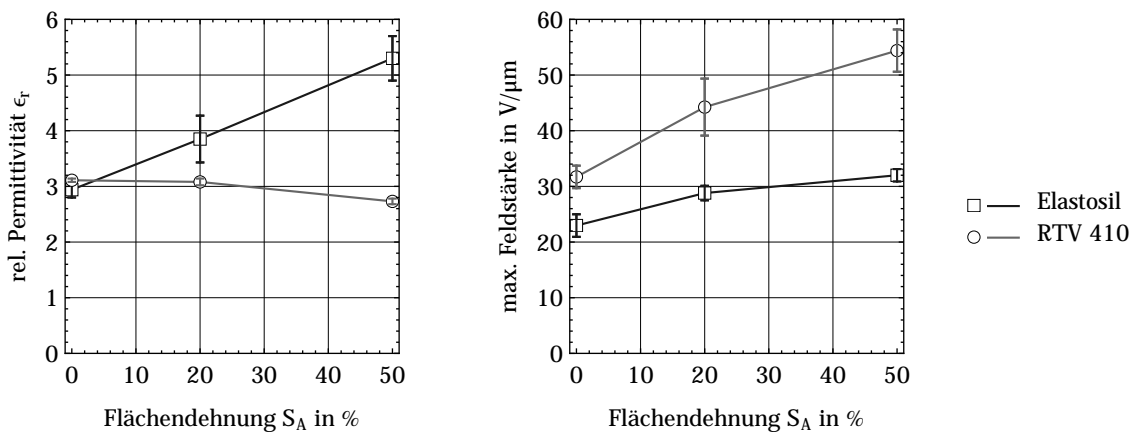


Abbildung 3.5: Einfluss der Dehnung.

Im Gegensatz zu den anderen Messungen konnten die Proben für die Untersuchung unter seitlicher Dehnung aufgrund des oben beschriebenen Schichtaufbaus nicht mit einer Vernetzungstemperatur $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ durchgeführt werden. Die Proben vernetzen bei Raumtemperatur. Dementsprechend liegt die Durchbruchfeldstärke von ungedehnten Filmen unter $30 \text{ V}/\mu\text{m}$.

Wie oben bereits dargestellt wurde, wird der lateralen Dehnung ein positiver Effekt auf die Durchbruchfestigkeit der Materialien vorausgesagt. Diese Erwartungen werden von den Ergebnissen, die in Abbildung 3.5 dargestellt sind, bestätigt. Dennoch ist die starke Zunahme der relativen Permittivität um 60 % überraschend, wird amorphen Polymeren doch eine konstante Permittivität auch unter Dehnung nachgesagt. [KSL05]

3.1.1.5 Einfluss der Schichtdicke

Für das kondensationsvernetzende Silikon RTV 410 hat die Schichtdicke einen großen Einfluss auf die Durchbruchfeldstärke. Aufgrund der schnellen Vernetzung können die Kondensate offenbar nicht aus dem Material entweichen und setzen die elektrische Spannungsfestigkeit herab. Das Elastosil® P7670 ist dagegen ein additionsvernetzendes Silikon, dessen Vernetzungsreaktion ohne die Bildung niedermolekularer Spaltprodukte erfolgt. Die daraus folgende Vermutung, dass die Durchbruchfeldstärke trotz wachsender Schichtdicke konstant bleibt, wird durch die Ergebnisse in Abbildung 3.6 bestätigt.

In Sonderfällen kann es, wie später noch gezeigt wird, sinnvoll sein, sehr dicke dielektrische Schichten durch mehrfaches Schleudern herzustellen. Abbildung 3.7 zeigt für diesen Fall, dass

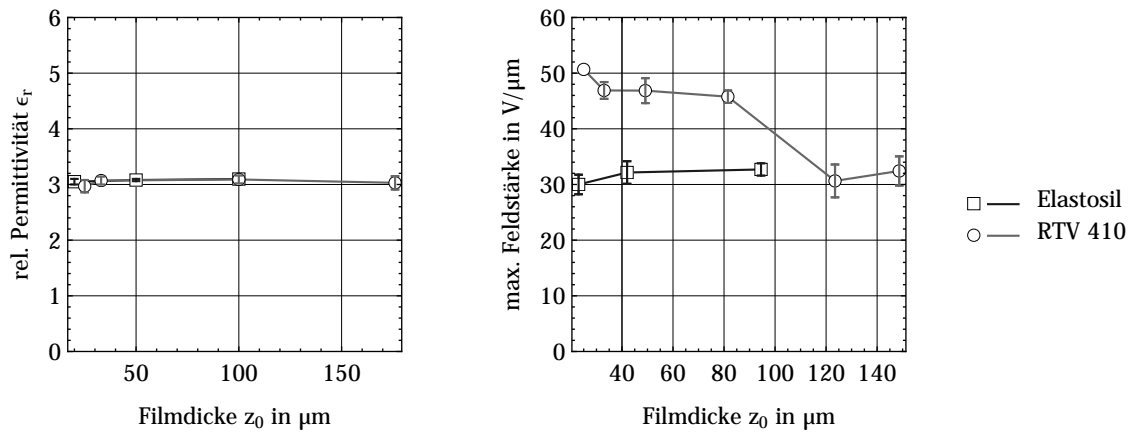


Abbildung 3.6: Einfluss der Schichtdicke.

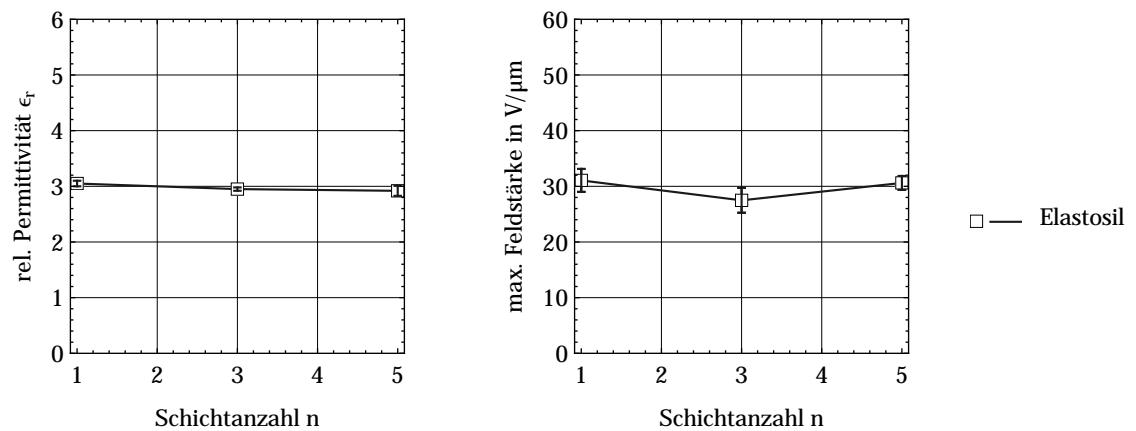


Abbildung 3.7: Einfluss der Schichtanzahl.

die Schichtqualität durch die wiederholte Prozessierung etwas schlechter wird. Mit jedem neuen Aufschleudern können mehr Verunreinigungen in den Schichtaufbau gelangen, die die Durchbruchfeldstärke beeinflussen. Diese zufälligen Einflüsse spiegeln sich in den größeren Vertrauensintervallen wider.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die Einflüsse während der Herstellung gemäß der gezeigten Ergebnisse neutrale bis gute Auswirkungen auf die Materialeigenschaften von Elastosil[®] P7670 haben. Bei gleicher Permittivität zeigt RTV 410 eine deutlich höhere Durchbruchfestigkeit als Elastosil[®] P7670, die allerdings durch die oben erwähnte, um ein Drittel höhere Härte teilweise kompensiert wird. Es ist aber vor allem das ungünstige Mischungsverhältnis von 40 : 1, dass eine weitere Verwendung von RTV 410 bisher verhindert hat.

3.1.1.6 Mechanische Eigenschaften

Die Elastizität des Elastomermaterials bestimmt zusammen mit dem elektrostatischen Druck der Elektroden die Auslenkung der Aktoren. Für die statische Auslenkung wird in der Regel der Elastizitätsmodul Y angegeben. Da die Auslenkung dielektrischer Elastomeraktoren immer einer Kompression entspricht, wird für die Charakterisierung des Elastomermaterials in dieser Arbeit das

uniaxiale Kompressionsmodul Y_c verwendet. Gemessen wird diese Größe in einem Druckversuch an Elastomerkörpern mit einer Höhe und einem Durchmesser von 10 mm. Abbildung 3.8 zeigt das Spannungs-Dehnungsverhalten von Elastosil[®] P7670 für zwei unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeiten.

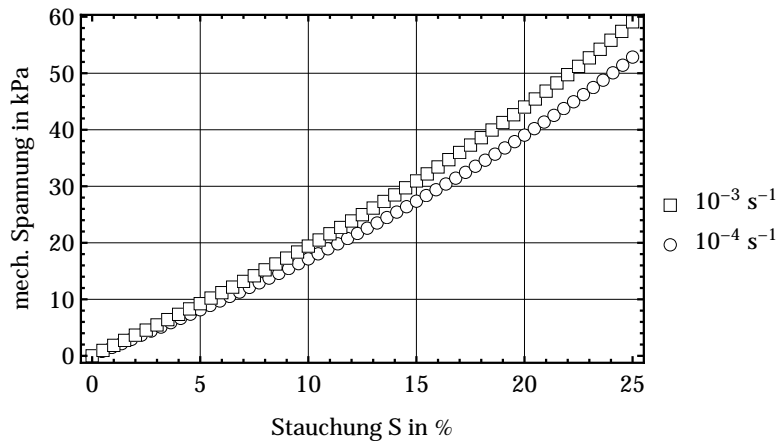


Abbildung 3.8: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Elastosil[®] P7670 für zwei unterschiedliche Deformationsgeschwindigkeiten.

Das uniaxiale Kompressionsmodul wird aus diesen Kennlinien als linearisierte Steigung ermittelt. Tabelle 3.2 zeigt die Werte für beide Kompressionsgeschwindigkeiten und Linearisierungen bis 5 %, 10 % und 25 %. Trotz der niedrigen Kompressionsgeschwindigkeiten von $\dot{S}_z = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ bzw. $\dot{S}_z = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ zeigt sich ein deutlicher Unterschied im Kurvenverlauf sowie in den ermittelten Werten. Je schneller das Material verformt wird, desto härter erscheint es.

Tabelle 3.2: Linearisierte Kompressionsmodule von Elastosil[®] P7670

\dot{S}_z	$S_{z, \max} = 5 \%$	$S_{z, \max} = 10 \%$	$S_{z, \max} = 25 \%$
10^{-4} s^{-1}	163,09 kPa	171,55 kPa	211,43 kPa
10^{-3} s^{-1}	184,09 kPa	194,18 kPa	236,39 kPa

3.1.2 Optimierung des Dielektrikums

Der Vergleich der Materialien in Tabelle 3.1 zeigt, dass eine Permittivität von $\epsilon_r = 3$ einen typischen Wert für Silikone darstellt, aber vergleichsweise gering gegenüber den Werten für PUR- oder Polyacryl-Materialien ist. Da die Deformation der Aktoren direkt proportional zur Permittivität ist, würde eine Erhöhung direkt die Auslenkung der Aktoren vergrößern oder aber die Betriebsspannung für eine bestimmte Auslenkung verringern.

Allerdings hat sich gezeigt, dass unter der Vielzahl kommerziell verfügbarer Silikonelastomere das im vorherigen Abschnitt untersuchte Elastosil[®] P7670 das einzige Material ist, das sich uneingeschränkt für den Schleuderprozess eignet. Es liegt daher der Gedanke nahe, gezielt die Permittivität dieses Materials zu erhöhen, ohne dabei die Steifigkeit oder die Durchbruchfestigkeit zu verändern.

Für eine Materialmodifikation gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Zum einen kann direkt die chemische Struktur der Polymerketten verändert werden, indem funktionalisierte Seitengruppen

an die Polymerketten addiert oder substituiert werden. Einer veränderten Härte des Materials kann dann durch eine Beeinflussung der Vernetzungsreaktion durch Verdünnen oder Einstellen des Verhältnisses der Teilkomponenten entgegengewirkt werden. Mit Hilfe einer Blockpolymerisation zweier unterschiedlicher Polymertypen haben JUNG u. a. einen Gummi hergestellt, der eine relative Permittivitätszahl $\epsilon_r = 14$ und eine Durchbruchfeldstärke $E_{\max} = 50 \text{ V}/\mu\text{m}$ aufweist. Allerdings ist dieses Material mit einem Elastizitätsmodul von $Y = 4 \text{ MPa}$ für die hier verfolgte Zielstellung zu hart [Jun+07].

Chemiebasierte Methoden bieten zwar einen sehr großen Spielraum der Materialveränderung, bedürfen aber einer tiefgehenden Kenntnis der Polymerchemie und eine entsprechende Laborausstattung und stehen damit außerhalb des Rahmens dieser Arbeit.

Das Einbringen einer zusätzlichen Materialphase in die Polymermatrix stellt die zweite Möglichkeit dar, die Permittivität des Elastomers zu verändern. Hierzu werden Partikel eines hoch permittiven oder leitfähigen Materials in das Polymer eingemischt.

Die durch das Einbringen einer zweiten Materialphase entstehenden Komposite werden danach unterschieden und beschrieben, wieviele räumliche Verbindungen zwischen einzelnen Teilen der beiden Phasen bestehen. Abbildung 3.9 zeigt eine Übersicht der möglichen Verbindungstypen. Die einzelnen Typen werden mit $X-Y$ bezeichnet, wobei X für die Anzahl der räumlichen Verbindungen des Füllstoffes und Y für die Verbindungsanzahl der Grundmatrix steht. Ein Faser-Verbundwerkstoff wird demnach mit 1-3 und ein Laminat mit 2-2 bezeichnet. Dielektrische Elastomerstapelaktoren bestehen in diesem Modell aus einer Siliconphase mit innenliegenden leitfähigen Elektroden und können als ein 2-3-Komposit beschrieben werden. Für die Permittivitätsverbesserung werden Partikel derart in die Polymermatrix eingebracht, dass keine Verbindung zwischen den Partikeln besteht. Die folgenden Betrachtungen und Untersuchungen beschränken sich daher ausschließlich auf 0-3-Komposite.

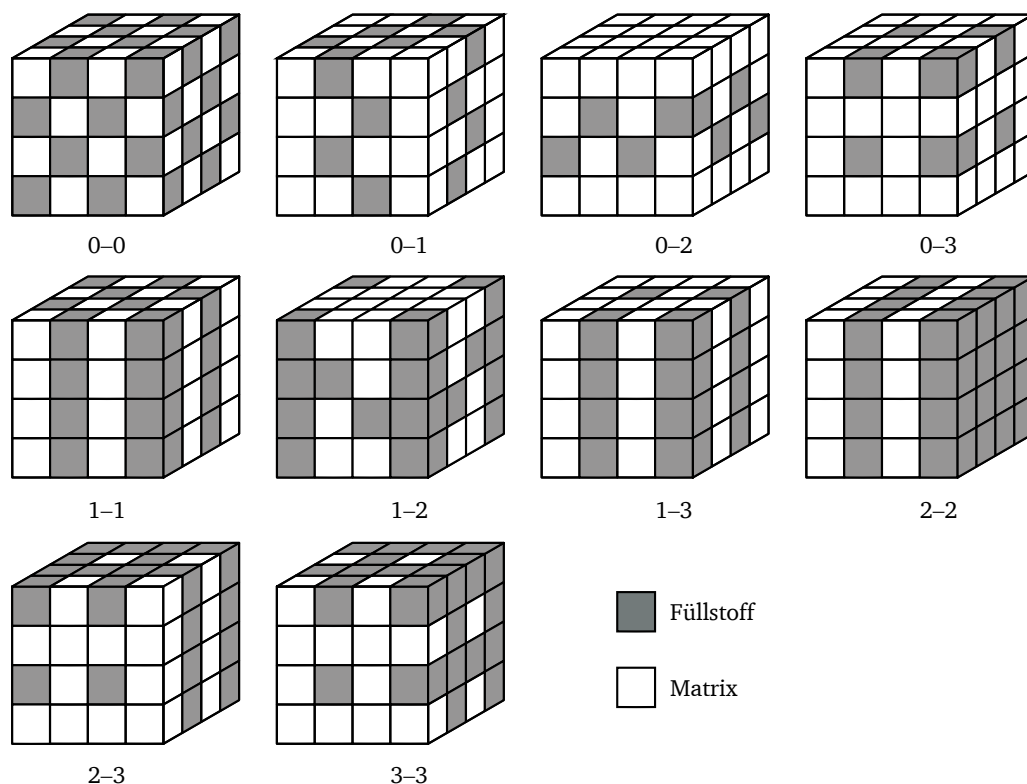


Abbildung 3.9: Klassifizierung von Kompositen aus zwei Materialien.

3.1.2.1 Materialmodelle Permittivität

Es existieren eine Reihe unterschiedlicher Modelle, um die Permittivität eines Komposites ε_k in Abhängigkeit der Permittivitäten von Matrix und Füllstoff, des Füllgrades sowie der Partikelform zu berechnen [Bee67].

Im Falle von leitfähigen Partikeln kann der Betrag der Permittivität in Abhängigkeit der Partikelkonzentration θ_f im Komposit mit Hilfe des Potenzgesetzes nach KIRKPATRICK beschrieben werden [Kir73]:

$$\varepsilon \approx \varepsilon_m \left(\frac{\theta_c}{\theta_c - \theta_f} \right)^s \quad (3.6)$$

Die Bezugskonzentration in Gleichung (3.6) ist die Perkolationsschwelle θ_c . Für Konzentrationen θ_f nahe der Perkolation kann für den Exponenten $s \approx 2$ angenommen werden [Cam+04; God08].

Liegt die Füllstoffkonzentration θ_f nahe der Perkolationsschwelle, zeigt Gleichung (3.6), dass sich in einem beliebigen Material praktisch beliebige Permittivitäten einstellen lassen. Der offensichtliche Nachteil ist, dass an der Perkolationsschwelle kleine Änderungen der Füllstoffkonzentration die Leitfähigkeit des Materials sehr stark beeinflussen. Es bedarf daher einer sehr genauen Kontrolle der Partikelkonzentration.

Für dielektrische Füllstoffe kann eine sehr grobe Abschätzung der resultierenden Permittivität vorgenommen werden, indem das gefüllte Polymer gemäß Abbildung 3.9 als ein 2–2-Komposit aufgefasst wird. Je nachdem, ob die Schichtung parallel oder orthogonal zum elektrischen Feld ausgerichtet ist, kann es als ein seriell oder parallel geschichtetes Dielektrikum aufgefasst werden. Für die obere und untere Grenzen der resultierenden Permittivität ε_k gilt damit:

$$\text{seriell: } \varepsilon_{k, \min} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_f}{\theta_m \varepsilon_f + \theta_f \varepsilon_m} \quad (3.7a)$$

$$\text{parallel: } \varepsilon_{k, \max} = \theta_m \varepsilon_m + \theta_f \varepsilon_f \quad (3.7b)$$

Die Größen ε_m und ε_f stehen hierbei für die Dielektrizitätszahlen der Polymermatrix (m) bzw. des Füllstoffes (f), θ_m und θ_f beschreiben entsprechend ihre Volumenanteile.

Die Betrachtung der Gleichungen (3.7) zeigt, dass ihre Werte für besonders kleine und besonders große Füllstoffanteile θ_f übereinstimmen. Für mittlere Konzentrationen unterscheiden sich die Gleichungswerte dagegen erheblich. Für eine genauere Vorhersage der resultierenden Permittivität ist es daher zweckmäßig, das gefüllte Dielektrikum als 0–3-Komposit zu betrachten.

Dieser Fall kann als ein mit kugelförmigen Partikeln gefülltes Elastomer angesehen werden. Von WAGNER stammt die erste Berechnung der Permittivität einer Mischung aus Kugeln, die sich in einem Dielektrikum befinden [Wag14]:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_m \left[1 + 3\theta_f \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_m}{2\varepsilon_f + \varepsilon_m} \right] \quad \text{mit} \quad \varepsilon_f > \varepsilon_m \quad (3.8)$$

Diese Gleichung gilt aber nur für kleine Konzentrationen $\theta_f < 10$ vol-% von Partikeln, deren Leitfähigkeit wesentlich größer als die des umgebenden Dielektrikums ist [Bee67].

Eine Verallgemeinerung dieser Gleichung ist die MAXWELL-WAGNER oder RAYLEIGH Gleichung, die unabhängig von der Partikelkonzentration und deren Leitfähigkeit gilt:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_m \left[1 + \frac{3\theta_f (\varepsilon_f - \varepsilon_m)}{2\varepsilon_m + \varepsilon_f - \theta_f (\varepsilon_f - \varepsilon_m)} \right] \quad \text{mit} \quad \varepsilon_f > \varepsilon_m \quad (3.9)$$

WAGNER leitete die Gleichung (3.8) speziell für die Bestimmung der Permittivität eines inhomogenen Dielektrikums ab. Im Gegensatz hierzu formulierte LICHTENECKER ein allgemeines Mischungsgesetz [Lic24a], um elektrische, thermische und optische Eigenschaften von Kompositen zu beschreiben [LR31]. LICHTENECKER und ROTHER fordern in der allgemeinen Herleitung dieses Gesetzes, dass sich die Eigenschaften des Komposites ausschließlich aus den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien und deren Volumenanteilen bestimmt. Einen Einfluss des Mischvorgangs auf die resultierenden Eigenschaften schließen sie explizit aus [LR31].

Das logarithmische Mischungsgesetz nach LICHTENECKER lautet [Lic24b]:

$$\log \varepsilon_k = (1 - \theta_f) \log(\varepsilon_m) + \theta_f \log(\varepsilon_f) \quad (3.10)$$

Abbildung 3.10 zeigt den Verlauf der Dielektrizitätszahl für Komposite aus einer Polymermatrix mit $\varepsilon_m = 3$ und Füllstoffen mit relativen Permittivitäten von 10, 100 und 1000 gemäß Gleichung (3.10). Bei Volumenkonzentrationen von bis zu 20 vol-% kann die Ausgangspermittivität bis zu verdreifacht werden.

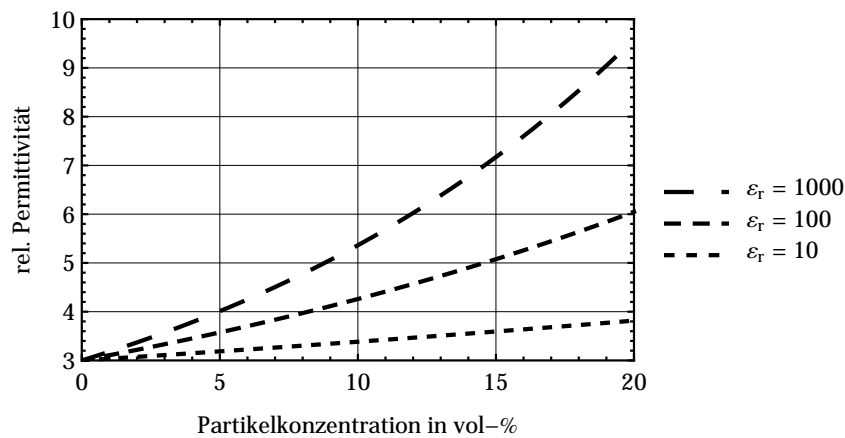


Abbildung 3.10: Dielektrizitätszahlen von Komposit und Polymermatrix für Füllstoffe mit unterschiedlicher Permittivität nach Gleichung (3.10).

3.1.2.2 Materialmodelle Elastizitätsmodul

Wie in Abbildung 3.11 dargestellt ist, hängt die Veränderung des Elastizitätsmoduls von der Partikelgröße ab. Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 1 μm verstärken die Polymermatrix, größere Partikel verdünnen die Matrix. Große Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 10 μm können die Polymermatrix sogar zerstören [Sch04].

Es gibt in der Literatur eine Reihe von Theorien, die sich mit dem Einfluss von Füllstoffen auf eine Polymermatrix befassen. Eine erste grobe Unterteilung kann anhand der Eigenschaften der

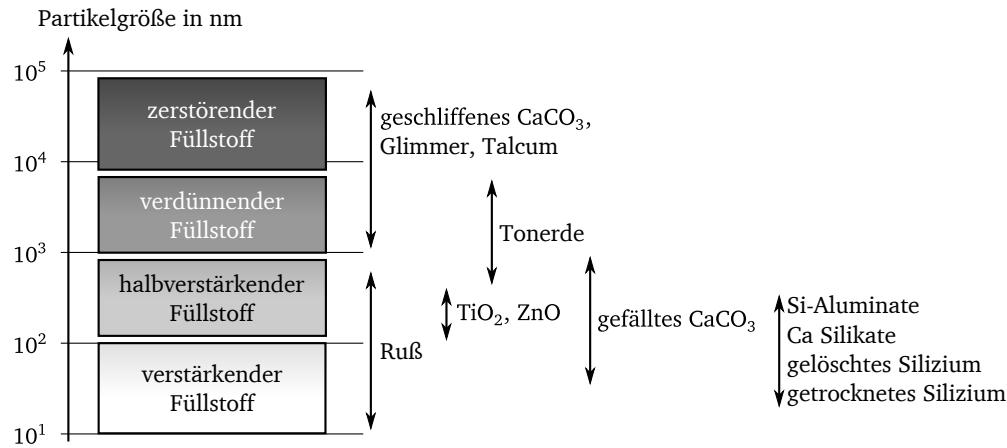


Abbildung 3.11: Einfluss des Partikeldurchmessers auf das Elastizitätsmodul nach [Sch04].

Polymermatrix und des Füllstoffes erfolgen. Für die hier interessierenden Komposite aus anorganischen Partikeln und einem weichen Elastomer sind es die Theorien, die sich auf feste Einschlüsse in einer nichtfesten Matrix beschränken.

Eine Übersicht über die verschiedenen Materialmodelle haben AHMED und JONES zusammengestellt. Als eine der vielseitigsten Theorien gelten die Gleichungen von KERNER [Ker56], die für harte Füllstoffe zur folgenden Form vereinfacht werden können [AJ90]:

$$G_k = G_m \left(1 + \frac{\theta_f}{\theta_m} \frac{15 (1 - \nu_m)}{8 - 10 \nu_m} \right) \quad (3.11)$$

Die Größe G bezeichnet hier das Schubmodul der Polymermatrix bzw. des Komposites, ν_m die Querkontraktionszahl der Polymermatrix. Ausgehend von dieser Gleichung zeigte NIELSEN folgenden Zusammenhang für den Elastizitätsmodul [Nie70]:

$$M_k = M_m \frac{1 + AB\theta_f}{1 - B\delta\theta_f} \quad (3.12)$$

Die Größe M ist hier ein allgemeiner Ausdruck und kann für Scher-, Elastizitäts- und Kompressionsmodul stehen. Der Koeffizient B steht für das Verhältnis der Elastizitätsmoduln von Polymermatrix und Füllstoff. Die Funktion $B\delta$ beschreibt insgesamt die Packungsdichte der Partikel. A steht schließlich für die Geometrie der Füllstoffpartikel und der Querkontraktionszahl der Matrix [AJ90]. Für harte, kugelförmige Partikel in einer weichen Polymermatrix mit einer Querkontraktionszahl $\nu \approx 0,5$ vereinfachen SZABO u. a. die KERNER-Gleichungen (3.11) und (3.12) zu folgendem Ausdruck [Sza+03]:

$$Y_k = Y_m \frac{1 + 1,5B\theta_f}{1 - B\theta_f} \quad (3.13)$$

Für die hier in Betracht kommenden Komposite liegt der Koeffizient B in einem Bereich zwischen 1,6 und 2,3 [Sza+03]. Abbildung 3.12 zeigt den relativen Einfluss der Füllstoffe auf den Elastizitätsmodul gemäß Gleichung (3.13). Ein Vergleich mit Abbildung 3.11 zeigt, dass der Füllstoff eine verhältnismäßig hohe Dielektrizitätszahl besitzen muss, damit die durch Gleichung (3.13) prognostizierte Versteifung kompensiert werden kann.

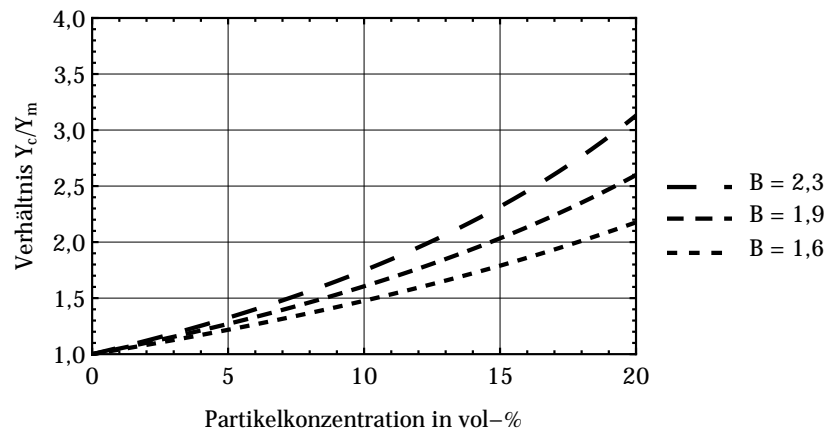


Abbildung 3.12: Verhältnis der Elastizitätsmoduln von reiner Polymermatrix und Komposit nach KERNER und SZABO. Die drei Kurven repräsentieren Werte für $B = \{1,6; 1,9; 2,3\}$.

3.1.2.3 Füllstoffe zur Erhöhung der Permittivität dielektrischer Elastomeraktoren

Zur Erhöhung der Dielektrizitätszahl kommen leitfähige sowie organische und anorganische nicht-leitfähige Partikel in Frage. Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über bisher eingesetzte Materialien und die erzielten Ergebnisse.

Leitfähige Füllstoffe

In bisherigen Arbeiten kamen vor allem die drei folgenden leitfähigen Materialien als Füllstoffe zum Einsatz:

- Graphit
- Kohlenstoffnanoröhren
- organische Füllstoffe: Phthalocyanine, Polyaniline, Polythiophene

CAMERON u. a. zeigten, dass die Permittivität von thermoplastischem Polyurethan mit Hilfe von Graphit auf über 200 gesteigert werden kann. Sehr nahe an der Perkolationsschwelle von 18 vol-% soll die Permittivität sogar bei über 4000 gelegen haben, konnte aufgrund der hohen Leitfähigkeit aber nicht mehr gemessen werden [Cam+04]. Durch die hohen Füllgrade kommt es zu einem weiteren Problem: die wesentlich steiferen anorganischen Partikel verhärten die Polymermatrix deutlich. Trotz der sehr hohen Permittivität erreichen Aktoren aus dem graphitgefüllten Polyurethan lediglich eine Deformation von 0,035 % [Cam+04].

Dieses Problem kann vermieden werden, wenn die leitfähigen Partikel klein sind und eine nicht-sphärische Form mit einem hohen Aspektverhältnis aufweisen. Für Kohlenstoffnanoröhren postulierten UNDERHILL und MICHALCHUK eine Perkolationsschwelle von lediglich 1,8 vol-% [UM05]. WANG und DANG erhöhten mit Multiwall-Kohlenstoffnanoröhren die Permittivität von PVDF auf 50, wobei die Konzentration mit 1,5 vol-% unterhalb der Perkolation blieb. Ähnliche Resultate zeigten DANG u. a., die eine 20-fache Erhöhung gegenüber der Ausgangspermittivität erreichten [Dan+03]. Die aufgeführten Arbeiten benutzten jeweils PVDF als Polymermatrix. Bisher gibt es keine Arbeiten, in denen der Einsatz von Kohlenstoffnanoröhren für dielektrische Elastomeraktoren untersucht wurde.

Organische Füllstoffe

Organische Füllstoffe sind in der Regel leitfähige Polymere wie Polyanillin oder Polyethylenthio-phen und Metallkomplexe.

Bei Verwendung dieser Materialien soll die Versteifung nicht so groß sein, wie beispielsweise mit Graphit [WD05]. Im Vergleich zu den Erhöhungen mit Kohlenstoffnanoröhren und Graphit bewegen sich die Ergebnisse mit organischen Füllstoffen jedoch auf einem deutlich niedrigeren Niveau. LÖWE, ZHANG und KOVACS sowie OPRIS u. a. konnten mit Cu-Phthalocyanin die Permittivität einer Silikonmatrix um den Faktor drei erhöhen, allerdings auch nur unter Inkaufnahme einer zu hohen Leitfähigkeit, die den Einsatz als dielektrisches Elastomer ausschließt [LZK05; Opr+09].

Polyhexylthiophen wurde von CARPI u. a. benutzt, um die Permittivität zu erhöhen und die Auslenkung eines Elastomeraktors aus diesem Material zu erhöhen. Bei einer Konzentration von 6 % gelang eine Verdreifachung der Permittivität bei einer lediglich moderaten Verringerung der Durchbruchfestigkeit. Im Gegensatz zu den partikelgefüllten Kompositen kam es hier zu einer Verringerung des Elastizitätsmoduls. Daher sahen CARPI u. a. ein Silikon mit lediglich 1 % Polyhexylthiophen als am besten für den Einsatz in dielektrischen Elastomeraktoren geeignet, da hier die Längenänderung im aktiven Zustand gegenüber dem reinen Silikon um den Faktor sieben vergrößert werden konnte [Car+08].

Anorganische Füllstoffe

Die dritte oben genannte Möglichkeit zur Permittivitätserhöhung sind anorganische, nichtleitfähige Partikel. Verwendung finden Metalloxide und ferroelektrische Keramiken, die sich durch hohe bis sehr hohe Permittivitäten auszeichnen. Die folgende Aufstellung nennt häufig in der Literatur beschriebene Füllstoffe:

- Titandioxid
- Bariumtitanat
- Blei-Zirkonium-Titanat (PZT)
- Blei-Magnesium-Niobat-Blei-Titanat (PMN-PT)

Titandioxid hat mit einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r \approx 100$ die niedrigste Permittivität der aufgelisteten anorganischen Füllstoffe. Dementsprechend sind verhältnismäßig große Füllgrade notwendig, um eine merkliche Verbesserung des Komposites gegenüber der Polymermatrix zu erreichen. CARPI und ROSSI sowie SZABO u. a. zeigten unabhängig voneinander eine Erhöhung der Permittivität um Faktoren zwischen 1,3 und 2, bei Füllgraden zwischen 30 vol-% und 40 vol-%. Die Durchbruchfestigkeit wurde durch das Einbringen der Partikel um bis zu ein Drittel des Ursprungwertes reduziert [CR05]. Bei einer Volumenkonzentration von 40 vol-% zeigte sich eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls um den Faktor 10 [Sza+03].

Die mittlere Dielektrizitätszahl von Bariumtitanat liegt zwischen 1000 und 1400 und kann sich mit der Partikelgröße verändern [Che05; DDG96]. Bei ähnlichen Volumenkonzentrationen sind damit etwa doppelt so hohe Erhöhungen der Permittivität zu erreichen wie mit Titandioxid. FROST, McGRATH und BURNS erreichten eine Verdreifachung, SZABO u. a. sogar eine Vervierfachung der Permittivität bei einer Partikelkonzentration von 30 vol-% [FMB96; Sza+03]. Die Füllstoffe führten aber auch hier zu einer deutlichen Verringerung der Durchbruchfestigkeit um fast die Hälfte [Sza+03].

Die letzten beiden Materialien PZT und PMN-PT besitzen Dielektrizitätszahlen, die deutlich über 1000 liegen. WONG u. a. konnten die Permittivität von PUR mit PZT vervierfachen, Informationen über die Beeinflussung von Durchbruchfeldstärke und Elastizitätsmodul liegen aber nicht vor. CARPI u. a. fanden für eine Volumenkonzentration von 10 vol-% PMN-PT eine so große Erhöhung des Elastizitätsmoduls, dass dieses Komposit für den Einsatz in dielektrischen Elastomeraktoren unbrauchbar erschien [Car+05]. Ähnliche Ergebnisse zeigten GALLONE u. a. sowie SZABO u. a.: Die Permittivität konnte um Faktoren zwischen 2 und 3,5 erhöht werden, bei praktisch unveränderter Durchbruchfestigkeit [Sza+03]. Allerdings liegt die Erhöhung des Elastizitätsmoduls in beiden Fällen in der gleichen Größenordnung und kompensiert damit eine mögliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit von dielektrischen Elastomeraktoren aus diesem Komposit.

3.1.2.4 Kennzahl zur Beurteilung der Materialverbesserung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, beeinflussen Füllstoffpartikel alle für dielektrische Elastomeraktoren relevanten Eigenschaften des Dielektrikums, wie Permittivität, Durchbruchfestigkeit und Elastizitätsmodul. Ob das Einbringen hochpermittiver Partikel in die Polymermatrix für den dielektrischen Elastomeraktor vorteilhaft ist oder die Eigenschaften insgesamt verschlechtert werden, kann also nur beurteilt werden, wenn alle drei Eigenschaften zusammen beobachtet und bewertet werden.

Für dielektrische Elastomeraktoren, bei denen der Quereffekt genutzt wird und damit die Längenänderung senkrecht zur Richtung des elektrischen Feldes im Vordergrund steht, haben SOMMER-LARSEN und LARSEN eine Kennzahl aufgestellt, mit denen sich die Leistungsfähigkeit verschiedener Elastomere bzw. Dielektrika vergleichen lässt [SLL04].

Da in der vorliegenden Arbeit die direkte Dickenänderung der Aktoren in elektrischer Feldrichtung im Vordergrund steht, kann eine Kennzahl κ für den Längseffekt ausgehend von Gleichung (2.21) definiert werden. Demnach ist die maximal erreichbare Auslenkung in erster Näherung abhängig von der Permittivität, dem Elastizitätsmodul und der Durchbruchfeldstärke E_{\max} :

$$\Delta z = z_0 \cdot \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{Y_c} \cdot E_{\max} \quad (3.14)$$

Als Referenzgröße für die Auslenkung der Elastomerstapelaktoren gelten die Materialparameter der ungefüllten Polymermatrix. Die Kennzahl κ kann damit als das Verhältnis der mit einem Komposit erreichbaren Auslenkung Δz_c zu der mit der reinen Polymermatrix erreichbaren Auslenkung definiert werden. Ausgedrückt durch die oben aufgeführten Materialparameter gilt für κ :

$$\kappa = \frac{\epsilon_{r,c}}{\epsilon_{r,m}} \cdot \frac{Y_{c,m}}{Y_{c,c}} \cdot \frac{E_{\max,c}^2}{E_{\max,m}^2} \quad (3.15)$$

3.1.3 Materialoptimierung für dielektrische Elastomerstapelaktoren

Die Darstellung der bisher publizierten Arbeiten zur Permittivitätsverbesserung von Polymeren hinterlässt ein zwiegespaltenes Bild. Auf der einen Seite wird das Potenzial deutlich, dass im Einbringen von hochpermittiven Füllstoffen liegt: Die Permittivität kann erhöht und die Betriebsspannung dielektrischer Elastomeraktoren damit im gleichen Maße gesenkt werden. Auf der anderen Seite wird die Verringerung der Betriebsspannung nicht im idealen Maße möglich sein, da

alle Füllstoffe zu einer Veränderung des Elastizitätsmoduls führen und die Durchbruchfestigkeit deutlich beeinträchtigen.

Darüber hinaus können die oben dargestellten Ergebnisse nicht direkt auf eine Anwendbarkeit für dielektrische Elastomerstapelaktoren übertragen werden. Für die Herstellung der Stapelaktoren ist neben den üblichen Materialeigenschaften dielektrischer Elastomeraktoren, Permittivität, Durchbruchfeldstärke und Elastizitätsmodul, auch die Viskosität der unvernetzten Komponenten von großer Bedeutung.

Die eigene Untersuchung der Permittivitätssteigerung soll daher mögliche Verbesserungsmöglichkeiten speziell für dielektrische Elastomerstapelaktoren aufzeigen. Dementsprechend wird neben der Veränderung der Materialparameter die Verarbeitbarkeit im Schleuderprozess als weitere Randbedingung mitberücksichtigt. Um die Durchbruchfestigkeit nicht mehr als notwendig zu beeinflussen, beschränken sich die folgenden Untersuchungen auf nichtleitfähige anorganische Füllstoffe.

Materialauswahl

Inwiefern sich das Standardmaterial Elastosil® P7670 für den Einsatz als Dielektrikum in Elastomerstapelaktoren durch Einbringen von Füllstoffen verbessern lässt, wird hier exemplarisch mit drei unterschiedlichen Materialien untersucht. Folgende Materialien wurden ausgewählt:

- Aluminiumoxid
- Titandioxid
- Bariumtitanat

In Tabelle 3.3 sind die wesentlichen Parameter dieser Füllstoffpartikel aufgeführt. Diese drei Materialien wurden ausgewählt, da ihre Dielektrizitätszahlen zwischen 10 und 1000 liegen und damit einen großen Bereich abdecken.

Wie bereits erwähnt wurde, spielt die Partikelgröße der Füllstoffe eine entscheidende Rolle. Abbildung 3.11 zeigt, dass kleinere Partikel grundsätzlich eher zu einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls führen, die für den Einsatz in dielektrischen Elastomeraktoren unerwünscht ist. Ebenso ist bekannt, dass die Permittivität von Keramiken mit zunehmender Verkleinerung abnimmt [DDG96].

Andererseits zeigen Untersuchungen speziell für Titandioxid, dass mit Partikelgrößen im Nanometerbereich im Vergleich zu mikrometergroßen Partikeln eine Verbesserung der Durchschlagfestigkeit zu erreichen ist [Roy+05]. Da die Schichtdicken im Elastomerstapelaktor nur einige zehn Mikrometer betragen und die Durchschlagfestigkeit quadratisch in die Kennzahl κ aus Gleichung (3.15) eingeht, werden Materialsorten mit Primärpartikelgrößen im Nanometerbereich gewählt.

Tabelle 3.3: Übersicht über die Materialeigenschaften der ausgewählten Füllstoffe

		Aluminiumoxid AEROXIDE® Alu C 805 Evonik Degussa	Titandioxid AEROXIDE® T 805 Evonik Degussa	Bariumtitanat Alfa Aesar
Dielektrizitätszahl ϵ_r	1	10	100	ca. 1000
Primärpartikelgröße d	nm	13	21	70
Dichte ρ	g/cm ³	3,9	4,05	5,85

Die ausgewählten Partikel werden direkt in die beiden Komponenten des Silikonmaterials eingemischt. Um die Partikel möglichst gut zu dispergieren, wird ein Ultraschall-Homogenisator (Sonoplus HD 3200, Bandelin Electronic) eingesetzt. Nach mehreren Beschallungszyklen sind die Füllstoffe so fein dispergiert, dass Proben aus den modifizierten Silikonkomponenten im Schleuderverfahren wie in Abschnitt 2.3 hergestellt werden können.

Ergebnisse

Abbildung 3.13 zeigt die Veränderung der Dielektrizitätszahl durch die anorganische Partikel. Es wurden nur Composite mit Füllstoffkonzentrationen bis zu $\theta_f = 5$ vol-% untersucht. Durch noch höhere Partikelkonzentrationen wird das gefüllte, aber noch unvernetzte Silikon zu viskos, um reproduzierbar Schichten im Schleuderverfahren herstellen zu können.

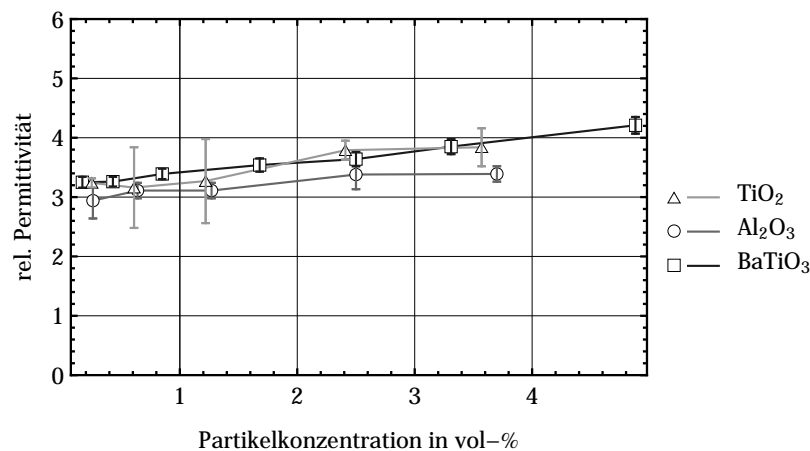


Abbildung 3.13: Veränderung der Dielektrizitätszahlen durch anorganische Partikel.

Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Füllstoffbeladung liegen die Messwerte für alle drei Materialien trotz der sehr unterschiedlichen Permittivitäten ihrer Füllstoffe noch eng beieinander. Dennoch ist erkennbar, dass Bariumtitanat die Dielektrizitätszahl am stärksten beeinflusst.

Abbildung 3.14 zeigt einen Vergleich der Modelle von LICHTENECKER und MAXWELL-WAGNER mit den Messergebnissen. Das MAXWELL-WAGNER-Modell unterschätzt die tatsächlichen Werte dieser Untersuchung, insbesondere der Proben mit Bariumtitanat, das die höchste Permittivität der drei Füllstoffe aufweist. Die Werte des LICHTENECKER-Modells stimmen vergleichsweise gut mit den Messwerten überein.

Das Diagramm in Abbildung 3.15 stellt den Einfluss der Füllstoffe auf die Durchbruchfeldstärke der Materialien dar. Nur bei wenigen Mischungen wird die ursprüngliche Feldstärke von $30 \text{ V}/\mu\text{m}$ erreicht. Am geringsten ist der Einfluss von kleinen Mengen Titandioxid, hier verbleibt immerhin eine Durchbruchfestigkeit oberhalb $25 \text{ V}/\mu\text{m}$. Den stärksten Einfluss hat Aluminiumoxid. Schon kleine Konzentrationen von etwa $0,25 \text{ vol-\%}$ führen zu einer Halbierung der Durchbruchfeldstärke.

Im Vergleich zu den Messwerten in Abbildung 3.13 fallen in Abbildung 3.15 die großen Schwankungen der Messwerte auf. Je nach individueller Probe unterscheiden sich die Durchbruchfeldstärken für eine Partikelkonzentration um mehr als $15 \text{ V}/\mu\text{m}$.

Der Elastizitätsmodul wird durch die drei Materialien sehr unterschiedlich beeinflusst, siehe Abbildung 3.16. Kleine bis mittlere Konzentrationen von Aluminiumoxid und Titandioxid haben kaum Einfluss auf die Elastizität des Materials. Bariumtitanat bewirkt eine eindeutige Reduzierung des

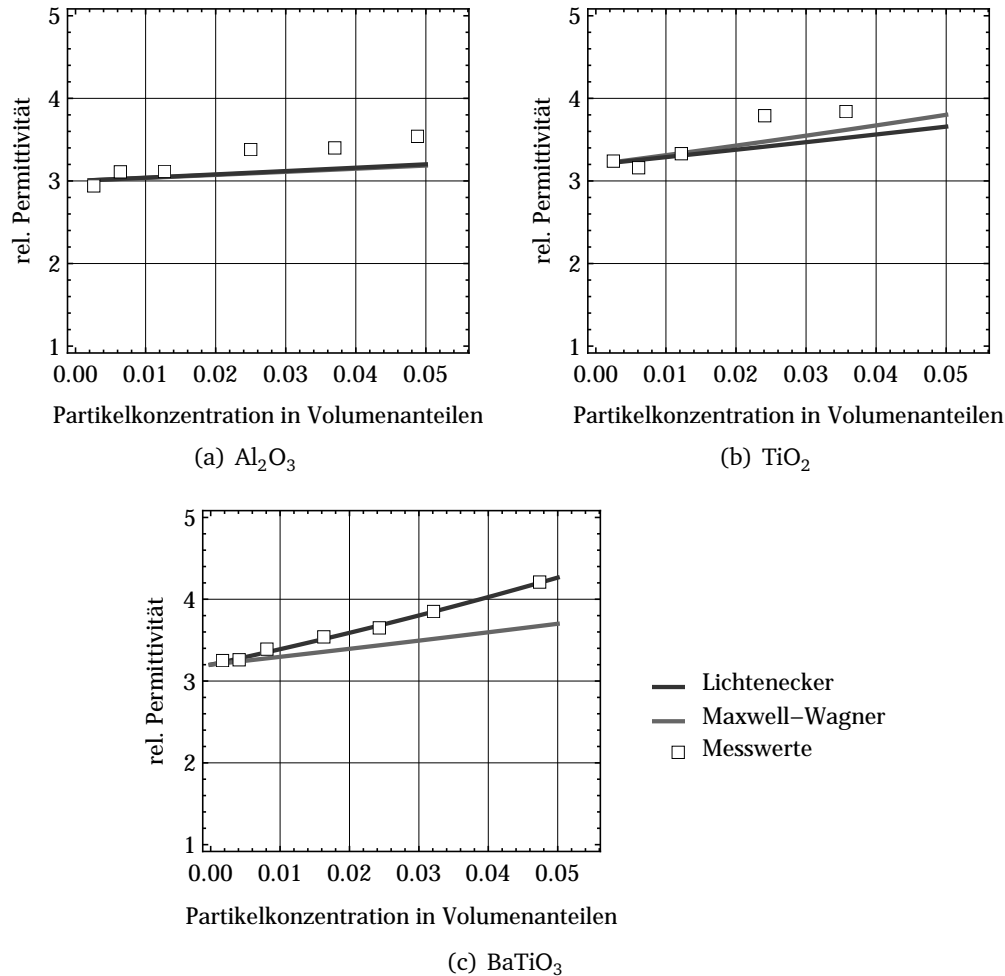


Abbildung 3.14: Vergleich der gemessenen Permittivitäten mit den Modellen von LICHTENECKER und MAXWELL-WAGNER.

Elastizitätsmoduls, die für Konzentrationen bis zu ungefähr 1 vol-% fortschreitet. Ab dieser Konzentration haben größere Mengen von Bariumtitanat keinen weiteren Einfluss mehr auf das Elastizitätsmodul.

Der Elastizitätsmodul verhält sich somit ganz anders, als durch die Theorie von KERNER vorausgesagt, siehe Abbildung 3.12. Diese Diskrepanz kann zu einem gewissen Teil durch die Partikelgrößen erklärt werden. Füllstoffe mit Primärpartikelgrößen im Nanometerbereich tendieren zur Bildung sehr stabiler Agglomerate, die mit Hilfe des verwendeten Einmischverfahrens nicht aufgebrochen werden können. Die tatsächliche Partikelgröße wäre daher wohl eher im Bereich zwischen halbverstärkendem und verdünnendem Einfluss nach Abbildung 3.11 einzuordnen. Diese Annahme wird durch die Vermutung unterstützt, dass die eingebrachten Partikel die Vernetzung behindern und dadurch das Material weicher machen [CR05].

Abbildung 3.17 zeigt schließlich die Kennzahl κ für die drei unterschiedlichen anorganischen Materialien bei allen untersuchten Füllstoffkonzentrationen.

Die Werte von κ zeigen deutlich, dass das Einbringen von Aluminiumoxid keinerlei Vorteile für das Dielektrikum von Elastomeraktoren bringt. Die starke Herabsetzung der Durchbruchfeldstärke, siehe Abbildung 3.15, kann durch die geringe Erhöhung der Permittivität in keiner Weise kompen-

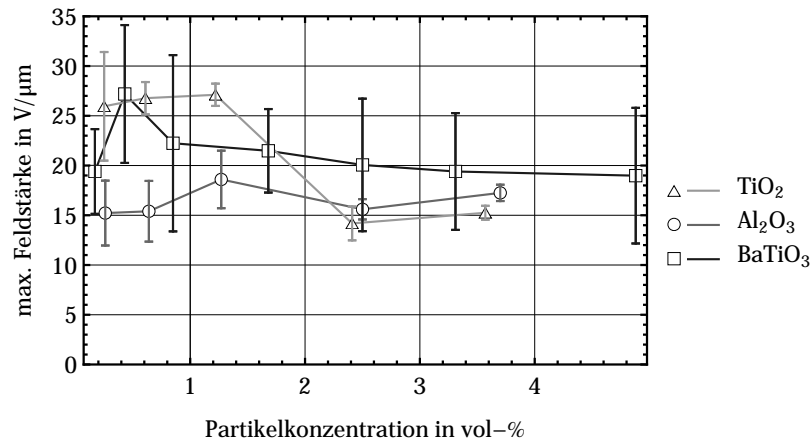


Abbildung 3.15: Einfluss der anorganischen Partikel auf die Durchbruchfeldstärke.

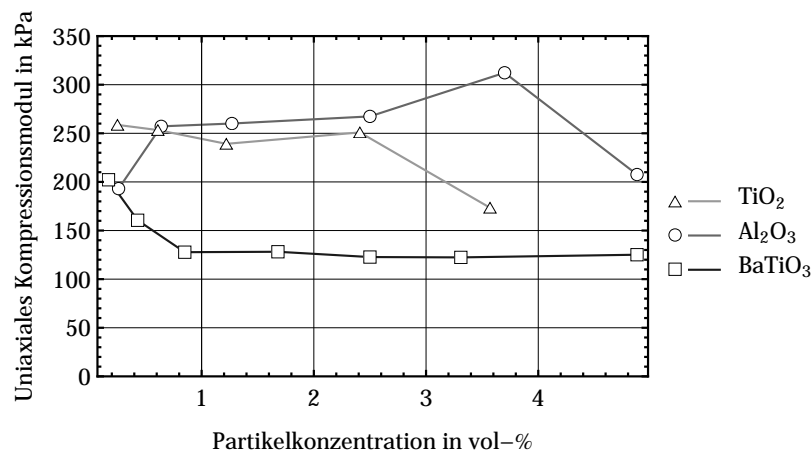


Abbildung 3.16: Einfluss der anorganischen Partikel auf das uniaxiale Kompressionsmodul.

siert werden. Das gleiche gilt, wenn auch nicht in gleichem Maße, für die mit Titandioxid gefüllten Proben. Damit bestätigen diese Ergebnisse frühere Resultate von CARPI und ROSSI [CR05].

Lediglich mit Konzentrationen von mehr als 0,5 vol-% Bariumtitanat sind Kennzahlen $\kappa > 1$ zu erreichen. Die Verbesserung ist hier aber auch mehr dem verringerten Elastizitätsmodul zuzuschreiben, der wesentlich stärker durch die Füllstoffe verändert wird, als die Permittivität. Die erste Kurve für Bariumtitanat in Abbildung 3.17 zeigt das κ für die Mittelwerte aller durchgeführten Messungen. Es ist demnach mit einer um 30 % verbesserten Aktorauslenkung zu rechnen. Wird hingegen das κ für ausgewählte Proben ohne Mittelwertbildung berechnet, ergibt sich die zweite Bariumtitanatkurve, die die maximal erreichbare Verbesserung mit Bariumtitanat aufzeigt. Demnach sind sogar um 40 % verbesserte Aktorauslenkungen zu erwarten.

Zusammenfassend kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, dass insbesondere mit Bariumtitanat eine Verbesserung der Auslenkung dielektrischer Elastomeraktoren zu erwarten ist. Diese Verbesserung basiert allerdings weniger auf einer erhöhten Permittivität als auf dem verringerten Elastizitätsmodul der Proben. Das Einmischen der Partikel in die unvernetzten Elastomervorstufen bringt jedoch einige Probleme mit sich, wie erhöhte Viskosität, schlechtere Vernetzbarkeit bei höheren Füllstoffkonzentrationen und die Gefahr von nichtaufgespaltenen Agglomeraten.

Andererseits bestehen Möglichkeiten, das Elastizitätsmodul auch durch Verdünnen der Elastomervorstufen zu erniedrigen. Für weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Materialoptimierung sollte diese

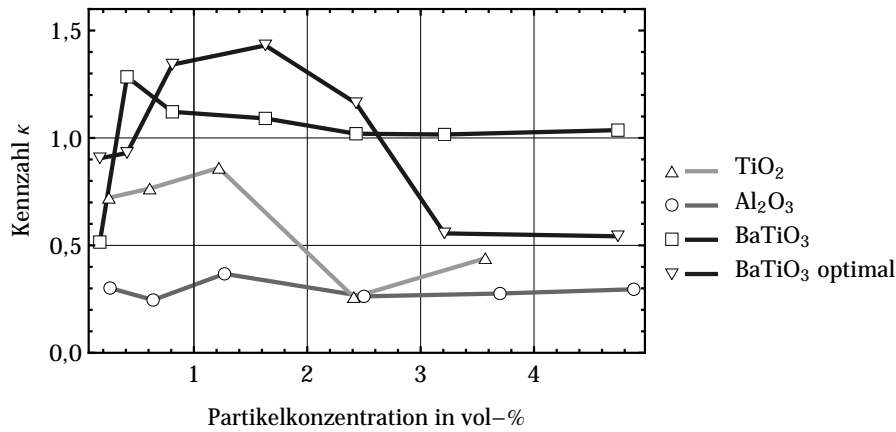


Abbildung 3.17: Vergleichskennzahl κ für die drei anorganischen Füllstoffe.

Möglichkeit daher auf jeden Fall in Betracht gezogen werden, da auf diese Weise eine Reihe der genannten Probleme vermieden werden können.

3.2 Elektroden

Den Elektroden kommt in dielektrischen Elastomeraktoren eine bedeutende Rolle zu. Wie in Abschnitt 2 bereits deutlich gemacht wurde, kann im Vergleich zu einem klassischen Plattenkondensator nur dann ein doppelt so hoher elektrostatischer Druck erreicht werden, wenn die Elektroden die Ausdehnung des Dielektrikums nicht behindern.

Im Spezialfall gestapelter dielektrischer Elastomeraktoren muss die Elektrode zusätzlich möglichst dünn sein. Praktisch alle in Abschnitt 3.2.1 dargestellten Elektrodenmaterialien stellen eine leitfähige Fläche durch die Neben- und Übereinanderlagerung einzelner Partikel her. Im gedehnten Zustand können die Partikel bis zu einer gewissen Grenze aneinander vorbeigleiten ohne den Kontakt zueinander zu verlieren. Die Dicke der leitfähigen Schicht ändert sich dabei aber nicht.

Im Stapelaktor stellen die Elektroden-schichten daher einen dickeninvarianten Anteil der Gesamtdicke dar. Um diesen abzuschätzen, ist es zweckmäßig die relative Stapeldickenänderung S_{Stapel} zur Längsdehnung S_z durch den elektrostatischen Druck ins Verhältnis zu setzen. Die Stapeldicke inklusive Elektroden im Ruhezustand wird dabei mit d_0 bezeichnet, die aktuierte Dicke mit d :

$$\frac{S_{\text{Stapel}}}{S_z} = \frac{1}{S_z} \cdot \left(\frac{d}{d_0} - 1 \right) \quad (3.16)$$

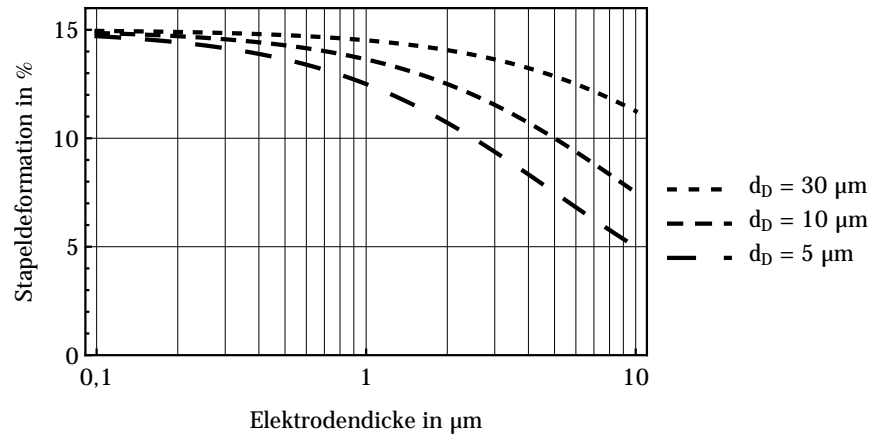
Die Stapeldicke d_0 setzt sich aus der reinen Dielektrikumsdicke d_D und dem Anteil γ der Elektroden zusammen. Im aktuierten Fall erfährt das Dielektrikum zusätzlich die Dehnung S_z :

$$d_0 = d_D (1 + \gamma) \quad \text{und} \quad d = d_D (1 + S_z) + \gamma d_D \quad (3.17)$$

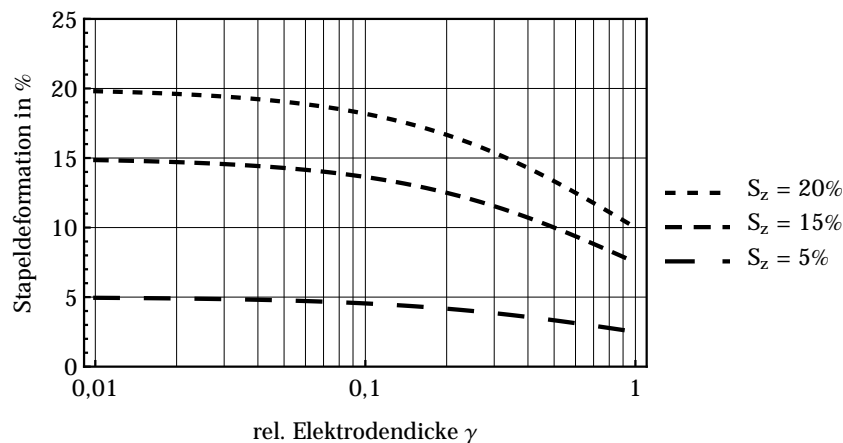
Werden die Zusammenhänge aus Gleichung (3.17) in Gleichung (3.16) eingesetzt, folgt für das Verhältnis der Dickenänderungen folgender Ausdruck:

$$\frac{S_{\text{Stapel}}}{S_z} = \frac{1}{1 + \gamma} \quad (3.18)$$

Dieses Ergebnis macht deutlich, dass die Stapeldeformation nur für verschwindend dünne Elektroden die Deformation eines einzelnen Films erreichen kann. In einem Stapelaktor, in dem Dielektrikum und Elektroden mit $\gamma = 1$ die gleiche Dicke besitzen, halbiert sich die Stapelauslenkung konsequenterweise gegenüber der Einzelschicht. Für kleine Elektrodendicken ist die Verringerung der Stapeldehnung direkt proportional zum Dickenverhältnis γ . Offensichtlich wird der nicht unerhebliche Einfluss der Elektroden in den Diagrammen in Abbildung 3.18.



(a) In Abhängigkeit der absoluten Elektrodendicke



(b) In Abhängigkeit der relativen Elektrodendicke γ

Abbildung 3.18: Einfluss der Elektrodendicke auf die Stapeldeformation. (a) Für verschiedene absolute Elektroden- und Dielektrikumsdicken und eine Dehnung $S_z = 15\%$. (b) In Abhängigkeit des Dickenverhältnisses γ und für verschiedene Längsdehnungen S_z .

Wie MATYSEK zeigt, sollte die Elektrode daher für nicht mehr als 10 % der Dicke eines Aktors verantwortlich sein, damit die Auslenkung des Aktors um ebenfalls nicht mehr als 9 % beeinträchtigt wird [Mat09].

Neben diesen mechanisch-geometrischen Eigenschaften sind natürlich die elektrischen Eigenschaften der Elektroden besonders wichtig. Tabelle 3.4 zeigt typische Parameter eines Elastomerstapelaktors. Wie in Abschnitt 2.3 gezeigt wurde, sind Schichtdicken in einem weiten Bereich möglich, 30 μm erlauben einen guten Kompromiss aus Auslenkung und Betriebsspannung. Die geometrischen Abmessungen ergeben sich aus der Größe des Schleudersubstrats und typischen Anwendun-

gen. Hieraus resultiert auch die hohe maximale Betriebsfrequenz von 500 Hz, die für die Verwendung der Aktoren in taktilen Displays notwendig ist [Mat09].

Tabelle 3.4: Typische Parameterwerte für dielektrische Elastomerstapelaktoren

Bedeutung	Parameter	Wert
Dicke Dielektrikum	d	$\approx 30 \mu\text{m}$
aktive Fläche	A	$< 100 \text{ mm}^2$
rel. Permittivität	ϵ_0	≈ 3
Breite Zuleitung	b	$< 1 \text{ mm}$
Länge Zuleitung	l	$> 20 \text{ mm}$
Betriebsfrequenz	f	$< 500 \text{ Hz}$

Aus diesen Parametern ergeben sich die Anforderungen an die Elektroden. Die wichtigste elektrische Anforderung ist eine so hohe Leitfähigkeit, die gewährleistet, dass die Kapazitäten der Aktoren auch bei höchsten Betriebsfrequenzen noch vollständig geladen werden.

Abbildung 3.19 zeigt einen schematischen Querschnitt und das Ersatzschaltbild eines dielektrischen Elastomerstapelaktors. Eine Reihe von verlustbehafteten Kapazitäten C stellen die einzelnen dielektrischen Schichten dar. Sie sind über Zuleitungswiderstände R_s mit der Betriebsspannung U verbunden.

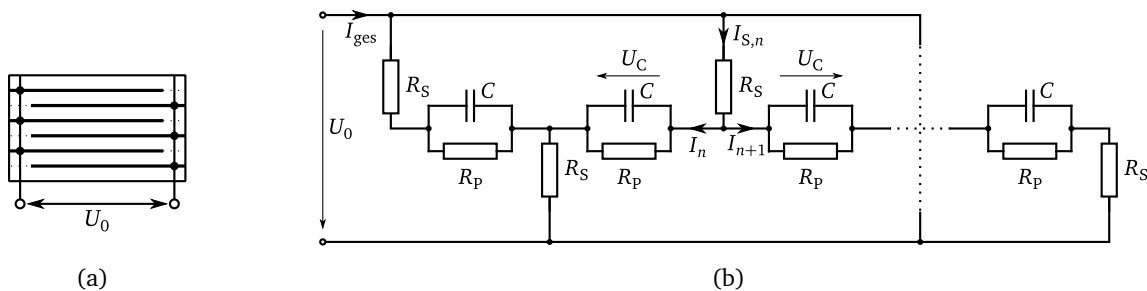


Abbildung 3.19: Dielektrischer Elastomerstapelaktor. (a) Elektrodenkontaktierung im schematischen Querschnitt. (b) Elektrisches Ersatzschaltbild.

In den innenliegenden Schichten bildet eine Elektrode mit den dielektrischen Schichten an ihrer Ober- und Unterseite zwei Kapazitäten. Der Zuleitungswiderstand R_s versorgt also zwei Kapazitäten C . Im Umkehrschluss, kann der Widerstand gedanklich in zwei parallele Widerstände der doppelten Größe aufgeteilt werden. Dann repräsentiert Abbildung 3.20 eine dielektrische Schicht mit der Einzelkapazität C und Zuleitungswiderständen $2R_s$.

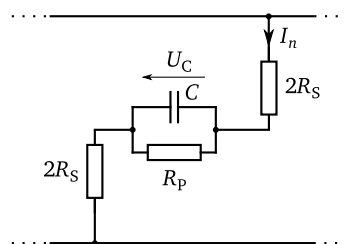


Abbildung 3.20: Ersatzschaltbild einer Einzelschicht aus Dielektrikum und zwei Zuleitungen in einem dielektrischen Elastomeraktor.

Unter der Vernachlässigung der beiden äußersten Schichten kann die elektrische Impedanz Z des Stapelaktors nun bestimmt werden:

$$Z = \frac{U}{I_{\text{ges}}} = \frac{U}{\sum_{n=1}^N I_n} = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{G_p + j\omega C} + 4R_s \right) \quad (3.19)$$

Im Allgemeinen zeigen Untersuchungen an den verschiedenen Materialien, die für dielektrische Elastomeraktoren verwendet werden, dass das Dielektrikum eine gewisse Leitfähigkeit G_p besitzt. Für den hier vorliegenden Fall von Elastomeraktoren aus Elastosil® P7670 zeigen eigene Messungen, dass der elektrische Widerstand mehr als $10^2 \text{ G}\Omega$ beträgt [Fli07]. Er kann daher in Gleichung (3.19) vernachlässigt werden.

Von außen stellt sich der Stapelaktor elektrisch gesehen damit als ein einfaches RC-Glied dar mit den Komponenten

$$C_{\text{Stapel}} = n C_{\text{Schicht}} \quad \text{und} \quad R_{s, \text{Stapel}} = \frac{4R_{s, \text{Schicht}}}{n} \quad (3.20)$$

Das Ladeverhalten dieses RC-Gliedes wird durch die Zeitkonstante τ bestimmt, die sich als unabhängig von der Schichtanzahl erweist:

$$\tau = R \cdot C = 4R_{s, \text{Schicht}} \cdot C_{\text{Schicht}} \quad (3.21)$$

Es ist aber nicht nur die Vielzahl an Elektroden, die in einem Stapelaktor betrachtet werden müssen. Aufgrund der eingeschränkten Leitfähigkeit muss auch die Modellierung der Elektrode kritisch überprüft werden. Abbildung 3.21 zeigt hierzu im oberen Teil die Teile einer typischen Elektrode im Stapelaktor. Der Anschluss zur Hochspannungsquelle wird aufgrund des geringen Widerstandes der Kupferleitungen im Folgenden vernachlässigt. Der erste zu betrachtende Widerstand R_z ist die Summe aus dem Übergangswiderstand und Zuleitungswiderstand an die aktive Elektrodenfläche. Als aktive Elektrodenfläche ist hierbei der Überlappungsbereich von Elektrode und Gegenelektrode zu verstehen. Die Elektrodenzuleitung besteht bereits aus dem Material der aktiven Elektrodenfläche und ergibt sich daher aus dem spezifischen Widerstand des Elektrodenmaterials und der Zuleitungsgeometrie.

Abbildung 3.21 zeigt das Ersatzschaltbild einer Elektrode, deren Länge l deutlich größer als die Breite b ist, als segmentiertes Modell. Im Vergleich mit Abbildung 3.20 und Gleichung (3.21) besteht folgender Zusammenhang

$$R_{\text{Schicht}} = R_z + R_{\text{Elektrode}} \quad (3.22)$$

Da die Leitfähigkeit des Elektrodenmaterials in der Regel nicht mit der metallischer Leiter vergleichbar ist, wird die Aktorelektrode selbst zunächst als Reihenschaltung von Widerständen und Kapazitäten aufgefasst.

Alternativ zu Abbildung 3.21 kann die Kontaktierung der Elektroden auch an der gleichen Seite erfolgen wie es in Abbildung 3.22 dargestellt ist. Für einen gleichmäßigen elektrostatischen Druck ist die Anordnung mit den Zuleitungen von zwei Seiten der einseitigen Variante vorzuziehen, da hier an allen Kapazitäten näherungsweise die gleiche Spannung abfällt. Bei der einseitigen Variante verringert sich die Spannungsamplitude von Glied zu Glied, wobei ab dem mittleren Glied

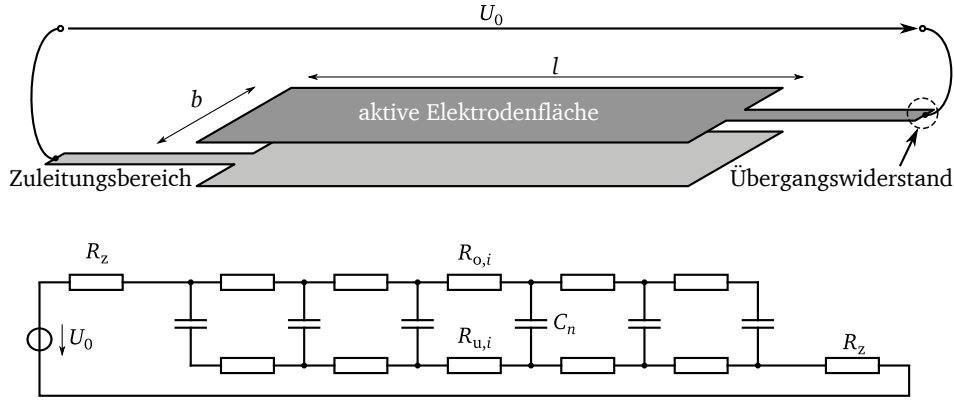


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung eines dielektrischen Elastomeraktors mit einfacher Elektrodengeometrie.

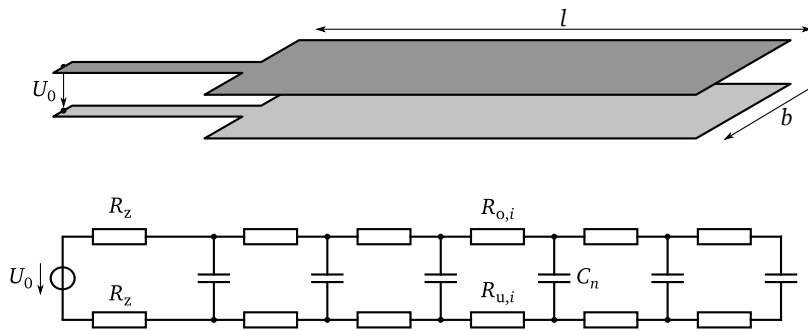


Abbildung 3.22: Dielektrischer Elastomeraktor mit alternativer Elektrodenkontaktierung.

die weitere Änderung vernachlässigbar wird. Für diese Randglieder ergeben beide Modelle den gleichen Spannungsabfall U_c über der Kapazität.

Der Spannungsabfall $U_{c, \text{Ende}}$ an der äußersten Kapazität der einseitigen Variante kann mit Hilfe von Kettenmatrizen berechnet werden. Die Kettenmatrix A eines T-Gliedes aus den Widerständen $R_{o,i}$, $R_{u,i}$ und der Kapazität C lautet [CW93]:

$$A = j\omega C \begin{pmatrix} R + \frac{1}{j\omega C} & R \left(R + \frac{2}{j\omega C} \right) \\ 1 & R + \frac{1}{j\omega C} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad R = \frac{1}{2} (R_{o,i} + R_{u,i}) \quad (3.23)$$

Somit setzt sich die gesamte Elektrode mit n Teilkapazitäten aus dem Zuleitungswiderstand $R_{\text{Zuleitung}}$, $(n - 2)$ T-Gliedern sowie einer Kapazität C jeweils am Anfang und am Ende der Kette zusammen, siehe auch Anhang B.1:

$$A_{\text{gesamt}} = A_{R, \text{Zuleitung}} \cdot A_{C, \text{Anfang}} \cdot (A_{\text{Elektrode}})^{n-2} \cdot A_{C, \text{Ende}} \quad (3.24)$$

Die Unterteilung der Elektrode in n Glieder führt dazu, dass sich die Kapazitäten C und Widerstände R aus Gleichung (3.23) entsprechend verkleinern:

$$A_{\text{Elektrode}} = j\omega C_n \begin{pmatrix} R_n + \frac{1}{j\omega C_n} & R_n \left(R_n + \frac{2}{j\omega C_n} \right) \\ 1 & R_n + \frac{1}{j\omega C_n} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad R_n = \frac{R_{\text{Elektrode}}}{n-1}, \quad C_n = \frac{C_{\text{Schicht}}}{n} \quad (3.25)$$

Aufgrund der Definition der Kettenmatrix A :

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} U_2 \\ -i_2 \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

ergibt sich mit $A = A_{\text{Elektrode}}$ die Spannungsamplitude an der letzten Teilkapazität C_{Ende} gerade zu

$$U_{C, \text{Ende}} = U_0 \frac{1}{A_{11}} \quad (3.27)$$

Für zwei extreme Elektrodenstrukturen mit einer Länge von jeweils $l = 20 \text{ mm}$ und Breiten von $b_1 = 1 \text{ mm}$ und $b_2 = 5 \text{ mm}$ zeigen die Abbildungen 3.23 die Einflüsse von Frequenz f und Widerstand R auf die an den Kapazitäten abfallende Spannungsamplitude. Die Diagramme zeigen für Akteure, die für Betriebsfrequenzen bis 500 Hz ausgelegt sind, dass für die Widerstände $R_n < 10 \text{ k}\Omega$ gelten muss. Nur dann fällt im gesamten Betriebsfrequenzbereich an den Elektroden mindestens 99 % der Betriebsspannung ab.

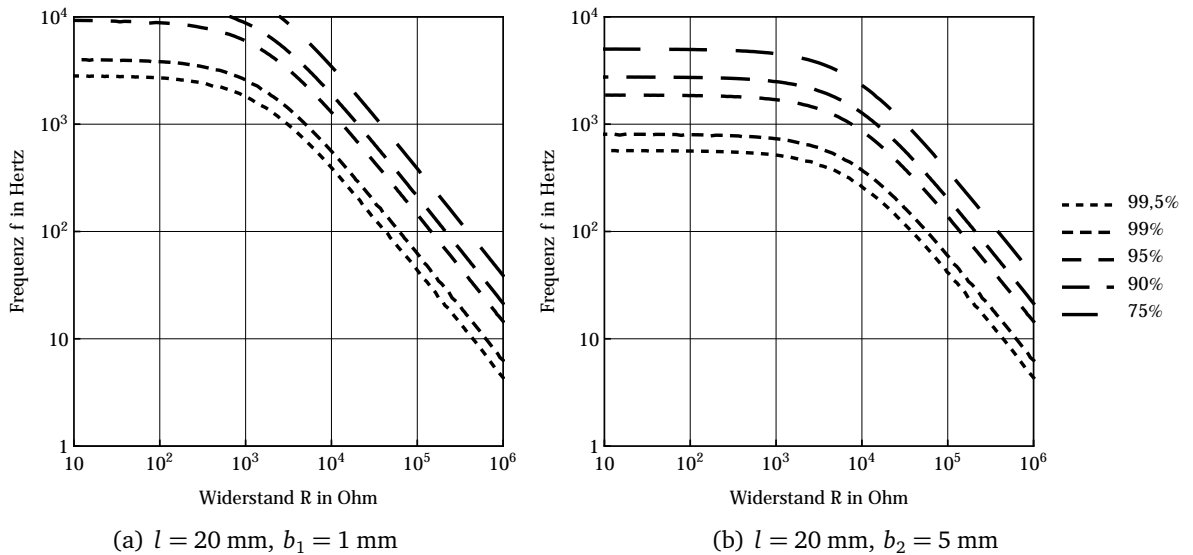


Abbildung 3.23: Amplitude an Kapazitätselementen nach Abbildung 3.22 in Abhängigkeit von Frequenz und Widerstand. Die Konturlinien kennzeichnen wie viel Prozent der Eingangsspannung über dem äußeren Kapazitätselement anliegen.

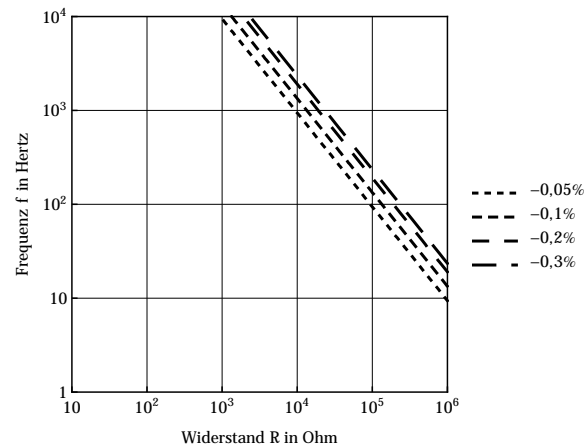
Für weitere Betrachtungen in diesem Kapitel kann auch für eine Einzelelektrode das Verhalten mit Hilfe eines RC-Gliedes modelliert werden. Hierfür werden die Parameter des RC-Gliedes wie folgt festgelegt:

$$R_{\text{RC}} = (n - 1)R_n + R_{\text{Zuleitung}} \quad \text{und} \quad C_{\text{RC}} = C_{\text{Schicht}} \quad (3.28)$$

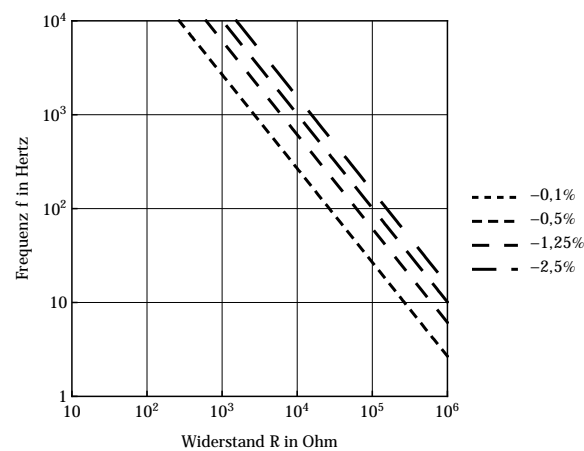
Damit kann die Zeitkonstante τ aus Gleichung (3.21) wie folgt angegeben werden:

$$\tau = 4 \left((n - 1) R_n + R_{\text{Zuleitung}} \right) \cdot C_{\text{Schicht}} \quad (3.29)$$

Die Diagramme in Abbildung 3.24 zeigen die relative Abweichungen der Amplitude für die Parameter aus Abbildung 3.23 zwischen dem segmentierten Modell und der RC-Modellierung. Die Abweichungen betragen maximal 2,5 %.



(a) $l = 20 \text{ mm}$, $b_1 = 1 \text{ mm}$

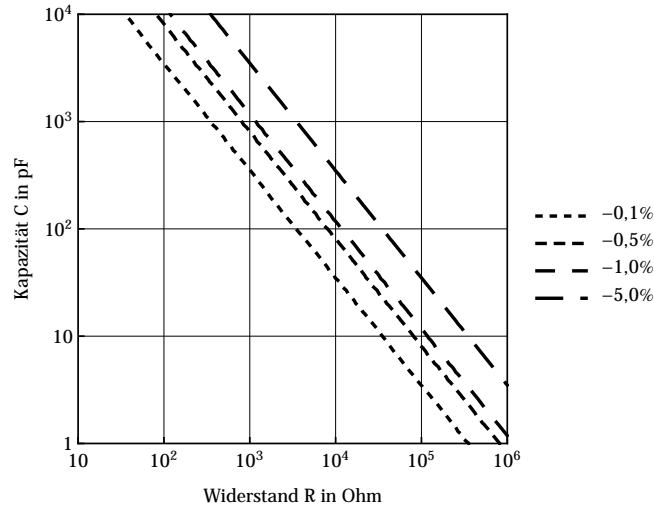


(b) $l = 20 \text{ mm}$, $b_2 = 5 \text{ mm}$

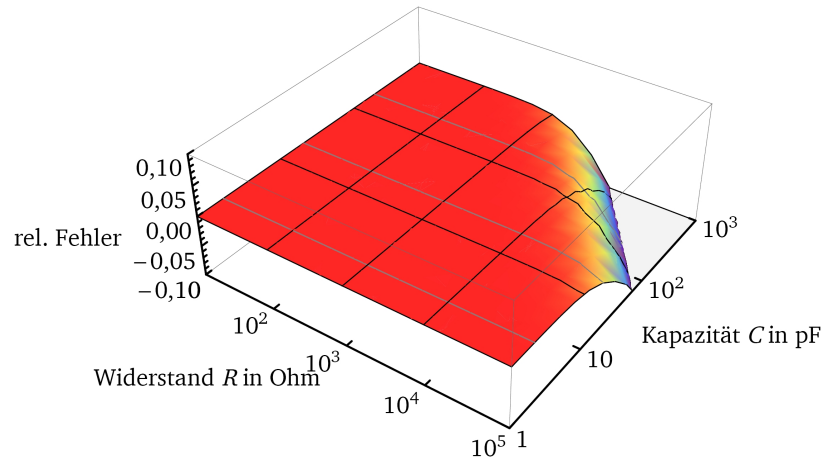
Abbildung 3.24: Relative Abweichung der Amplitude an Kapazitätselementen nach Abbildung 3.22 und einem RC-Glied in Abhängigkeit von Frequenz und Widerstand. Die Konturlinien kennzeichnen die Größe des relativen Fehlers.

Da die Abbildungen 3.23 und 3.24 nur für die oben genannte spezielle Elektrodengeometrie gelten, zeigt Abbildung 3.25 die relativen Abweichungen in Abhängigkeit des Widerstandes und der Gesamtkapazität der Aktorschicht. Zur besseren Orientierung zeigt das rechte Diagramm die gleichen Daten in einer 3D-Ansicht. Typische Kapazitäten einer Aktorschicht liegen im Bereich zwischen 10 pF und 50 pF .

In Abschnitt 3.2.1 werden eine Reihe von Materialien vorgestellt, die grundsätzlich für dielektrische Elastomeraktoren in Frage kommen und teilweise im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Hierbei zeigt sich, dass von den reinen Materialeigenschaften nicht immer direkt auf die elektrischen Eigenschaften im Elastomeraktor geschlossen werden kann. So unterscheidet sich beispielsweise der spezifische elektrische Widerstand von Graphit deutlich vom spezifischen Widerstand der Graphitelektroden. Dies ist nicht überraschend, da für die Elektrodenherstellung pulverförmiges Graphit verwendet wird. Übergangswiderstände zwischen den Partikeln und unvermeidliche Verunreinigungen erhöhen den Widerstand um mehrere Größenordnungen. Im Fall metallischer Elektroden haben Grenzflächeneffekte zwischen Dielektrikum und Elektrode Einfluss auf Topologie, Struktur und Haftung. Makroskopisch beeinflussen diese Eigenschaften der Metallschicht aber auch die Leitfähigkeit. Es ist daher sinnvoll in Gleichung (3.28) einen Parameter zu



(a) $f = 1000 \text{ Hz}$



(b) $f = 1000 \text{ Hz}$

Abbildung 3.25: Relative Abweichung der Amplitude an Kapazitätselementen nach Abbildung 3.21 und einem RC-Glied in Abhängigkeit von Frequenz und Widerstand.

benutzen, der sowohl die Materialeigenschaften als auch den Einfluss der Herstellungstechnologie berücksichtigt.

Allgemein beschreibt der Flächenwiderstand R_{\square} den elektrischen Widerstand einer quadratischen leitfähigen Schicht mit einer definierten Dicke d_0 . Der Widerstand einer beliebigen rechteckigen Elektrode mit einer Länge l , Breite b und Dicke h hat demnach einen elektrischen Widerstand

$$R = R_{\square} \frac{l}{b} \frac{h_0}{h} \quad (3.30)$$

Da dieser Widerstand auf ein Quadrat bezogen ist, wird die Einheit des Schichtwiderstandes wie folgt angegeben:

$$[R_{\square}] = \text{k}\Omega_{\square} \quad (3.31)$$

Um die Größenordnung des Schichtwiderstandes für die Elektroden eines dielektrischen Stapelaktors abzuschätzen, kann der aus Abbildung 3.23 abgeleitete Wert für ein Elektrodenelement

aus Abbildung 3.22 übernommen werden. Dementsprechend sollte der Schichtwiderstand einer Elektrode im Bereich $R_{\square} = R_n \approx 10 \text{ k}\Omega_{\square}$ liegen.

Zum Vergleich der Qualität verschiedener Elektrodenmaterialien kann der Flächenwiderstand einfach messtechnisch ermittelt werden. Damit dies auch an sehr dünnen metallischen Schichten zerstörungsfrei erfolgen kann, wurde ein Messplatz entwickelt, der in Abschnitt 4.2 vorgestellt wird.

Materialien, die als Elektroden in dielektrischen Elastomerstapelaktoren in Frage kommen und teilweise bereits eingesetzt werden, werden im nächsten Abschnitt ausführlich vorgestellt.

3.2.1 Elektrodenmaterialien

Eine der besonderen Eigenschaften der Elektroden von dielektrischen Elastomeraktoren ist ihre Dehnbarkeit. Bei keinem anderen Aktorprinzip muss die Elektrode eine Vervielfachung der Ausgangsfläche von mehreren 100% aushalten. Die in der Literatur vorgestellten Möglichkeiten zur Elektrodenherstellung von dielektrischen Elastomeraktoren lassen sich anhand der verwendeten Materialien in fünf Kategorien aufteilen:

- Ionenimplantation
- Metalle
- Polymere
- Graphit- und Ruß
- Kohlenstoffnanoröhren

Ionenimplantation

Eine direkte Lösung der Elektrodenproblematik untersuchen DUBOIS und ROSSET seit einigen Jahren [DRK05]. Die Oberfläche des als elastisches Dielektrikum verwendeten Silikons wird durch Beschuss mit Metallionen elektrisch leitfähig. Es ist dadurch keine explizite Elektrode mehr notwendig und es entsteht keine Topologie aufgrund von zusätzlichem leitfähigem Material auf der Elektrode.

Es wurden bisher eine Vielzahl von Metallen untersucht, allerdings zeigen nur Elektroden aus edlen Metallen wie Gold und Paladium zeitlich stabile Widerstandswerte im Bereich zwischen $1 \text{ k}\Omega_{\square}$ und $10 \text{ k}\Omega_{\square}$ [Ros+08a]. Noch höhere Leitfähigkeiten sind prinzipiell möglich, allerdings nur unter Inkaufnahme einer drastischen Versteifung der Polymermembran um bis zu einer Größenordnung [Ros+08b].

Die implantierten Elektroden haben eine Dicke von ca. 50 nm. Durch eine Schattenmaskierung kann die Implantation strukturiert werden und es können Aktorelemente mit einem minimalen Durchmesser von 1,5 mm erzeugt werden. Allerdings muss hierzu der Film gewendet werden, da die Elektroden nur durch die Oberseite implantiert werden können [Ros+09].

Metalle

Um sehr hohe Leitfähigkeiten zu erreichen, liegt es nahe, Metallschichten als Elektroden zu verwenden. Offensichtlicher Nachteil solcher Elektroden ist die hohe Steifigkeit und niedrige Bruchdehnung metallischer Schichten. Eine Möglichkeit, die geringe Elastizität zu erhöhen haben KORNBLUH u. a. schon sehr früh gezeigt, indem sie gesputterte Goldelektroden lithographisch in einem Zick-Zack-Muster strukturieren. Hiermit wurde die Dehnbarkeit um den Faktor 20 gesteigert. Allerdings haben die verbleibenden Goldbahnen eine Breite von nur $50\text{ }\mu\text{m}$ und es ist daher ein zweites leitfähiges Material notwendig, um eine gleichmäßige Ladungsverteilung auf dem Dielektrikum zu erreichen [Kor+99].

Die zweite Möglichkeit wurde von BENSLIMANE, GRAVESEN und SOMMER-LARSEN entwickelt. Eine der beiden Oberflächen des Dielektrikums erhält während der Vernetzung eine gewellte Struktur, siehe Abbildung 3.26. Auf diese Seite wird in einer Durchlaufanlage eine Silberschicht mit einer Dicke von 100 nm aufgesputtert. Nach dem Zusammenfügen von zwei dieser metallisierten Filme zu einer Aktorfolie, kann sich die Folie bei Anlegen eines elektrischen Feldes unidirektional dehnen BENSLIMANE, GRAVESEN und SOMMER-LARSEN. Aufgrund der Wellenstruktur bleibt die metallisierte Fläche trotz dieser Dehnung konstant und wird mechanisch nicht belastet. Mit Hilfe dieser Technik werden Elastomeraktorfolien mittlerweile industriell unter dem Namen PolyPower® hergestellt [KB09].

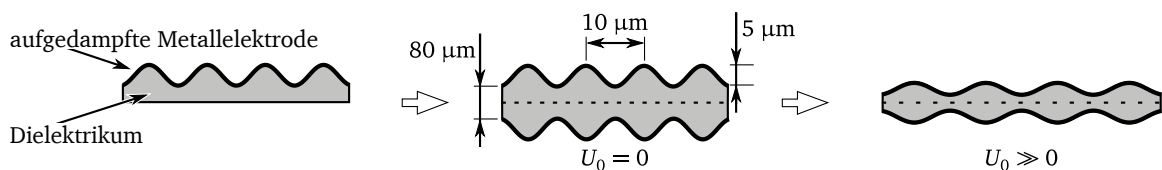


Abbildung 3.26: Bedeutung der Wellenstruktur in PolyPower®-Folien für die Dehnbarkeit der Elektrode [KB09].

Leitfähige Polymere

Leitfähige Polymere bieten wie Metalle die Möglichkeit sehr dünne Elektroden herzustellen. Die Leitfähigkeit ist deutlich geringer als in metallischen Schichten, kann aber durchaus im Bereich von $1\text{ k}\Omega_{\square}$ liegen. Die wichtigsten Vertreter leitfähiger Polymere sind:

- Polythiophen (PEDOT)
- Polyanillin (PANI)
- Polypyrrol (PPy)

Für den Vorteil sehr dünner Schichtdicken von einigen zehn Nanometern muss eine vergleichsweise aufwändige Prozessierung in Kauf genommen werden [Su+98]. Die geringen Materialstärken können nur durch eine direkte Polymerisation auf dem Dielektrikum oder durch Tauch- bzw. Schleuderverfahren erreicht werden. Eine einfache Schattenmaskierung wie bei den anderen vorgestellten Materialien ist hier nicht ohne weiteres möglich. Liegen die Polymere in wässrigen Lösungen vor, ist im Fall von Silikon als Dielektrikum eine Plasmabehandlung zur Verbesserung der Benetzbarkeit durch eine Oberflächenaktivierung notwendig.

Graphit und Ruß

Die weitaus größte Verbreitung der verschiedenen Elektrodenmaterialien haben Elektroden auf Kohlenstoffbasis. Der Kohlenstoff kann dabei in drei unterschiedlichen Konfigurationen vorliegen: Graphit, Ruß und Kohlenstoffnanoröhren. Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die ersten beiden dieser drei Konfigurationen. Da sich Kohlenstoffnanoröhren in einigen Eigenschaften stark unterscheiden, werden diese im nachfolgenden Abschnitt gesondert besprochen.

Graphit ist die natürliche, als Mineral vorkommende Form des Kohlenstoffs. Im Kristall sind die Atome in parallelen Schichten angeordnet, innerhalb dieser Schichten in einer hexagonalen Struktur, siehe Abbildung 3.27. Diese anisotrope Kristallstruktur spiegelt sich makroskopisch in den ausgeprägt anisotropischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Graphit wider. Kommerzielles pulverförmiges Graphit (*graphite powder*) besteht aus kantigen Partikeln mit einem Durchmesser zwischen 2 µm und 50 µm, je nach Feinheit des Pulvers.

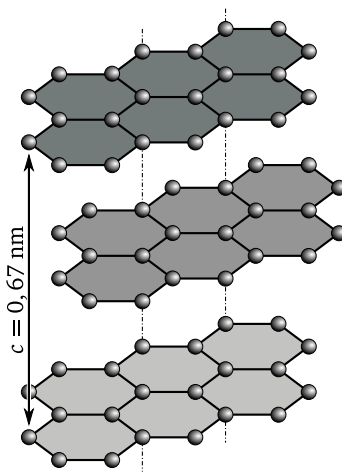


Abbildung 3.27: Kristallstruktur von Graphit.

Ruß (*carbon black*) ist ein industrielles Produkt und wird vor allem als Füllstoff zur Einstellung der mechanischen Eigenschaften von Polymeren genutzt. Durch die pyrolytische Herstellung aus Kohlenwasserstoffen besteht Ruß aus kugelförmigen Aggregaten. Diese Primärpartikel mit einem Durchmesser von etwa 100 nm agglomerieren zu Teilchen mit einem Durchmesser, die in der Größenordnung der Graphitpartikel liegen.

In monolagigen Aktoren auf VHB4905-Basis erfahren die Elektroden enorme Dehnungen und werden durch keine Deckschicht geschützt. Daher werden für diese Aktoren sehr oft kommerzielle Graphitpasten (*carbon grease*) [Car+03; Kor+99] oder Graphit-Elastomerkomposite [KSL08] verwendet.

Für mehr- und vielschichtige Aktoren sind diese Elektroden allerdings zu dick. KOVACS und DÜRING haben ein Verfahren entwickelt, den Industrieruß Ketjenblack EC so dünn auf das Dielektrikum aufzutragen, dass die Elektrode praktisch aus nur einer Partikelschicht besteht [KD09].

Für die von JUNGSMANN entwickelte und im Rahmen der vorliegenden Arbeit verbesserte Elektrodenherstellung, die in Abschnitt dargestellt 3.3.2 wird, wurden folgende Graphit- und Rußsorten untersucht:

- MF2, NGS Naturgraphit GmbH
- Vulcan XC-72, Cabot Corp.
- Ketjenblack EC-300J, Akzo Nobel Polymer Chemicals B. V.

Von diesen drei Materialien zeigt das Naturgraphit die besten elektrischen Eigenschaften und die einfachste Prozessierbarkeit [Ham09]. Abbildung 3.28 zeigt einen Ausschnitt einer Elektrode aus diesem Graphitmaterial. Die oben besprochenen kantigen Partikel mit einer Größe von ca. 2 μm sind gut zu erkennen.

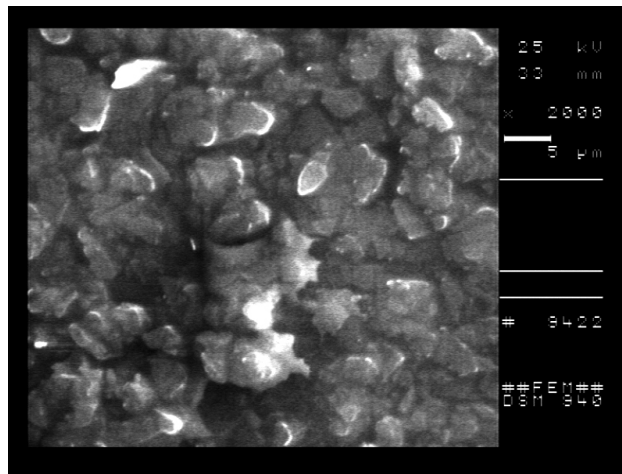


Abbildung 3.28: REM Aufnahme einer typischen Stapelaktorenelektrode aus MF2.

Kohlenstoffnanoröhren

Kohlenstoffnanoröhren sind die oben bereits erwähnte dritte Konfiguration von Kohlenstoff mit einem hexagonalen Kristallgitter. Kohlenstoffnanoröhren werden in der Regel aus der Gasphase abgeschieden und wurden das erste Mal Anfang der 1990er Jahre von IJIMA synthetisiert und beschrieben [Iij91].

Es werden zwei grundlegende Arten von Nanoröhren beschrieben: *single wall carbon nano tubes* (SWCNT) bestehen aus lediglich einer Gitterwand, *multi wall carbon nano tubes* (MWCNT) können dagegen bis zu 50 koaxiale Gitterwände besitzen. Die Röhrenform führt zu einem extremen Aspektverhältnis: der typische Durchmesser beträgt für SWCNT weniger als 5 nm, bei MWCNT ungefähr das zehnfache. Die Länge kann bei beiden Arten bei mehreren Mikrometern liegen.

Als Elektrodenmaterial in dielektrischen Elastomeraktoren sind Kohlenstoffnanoröhren aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit interessant, die als vergleichbar mit Kupfer angegeben wird [Bax03]. Durch das hohe Aspektverhältnis ist zudem zu erwarten, dass eine hohe Flächenleitfähigkeit schon mit sehr geringen Schichtdicken zu erreichen ist.

BOCHAROVA u. a. haben extrem dünne leitfähige Schichten aus MWCNT auf Glas hergestellt. Schichten mit einem Transmissionskoeffizienten für Licht von 70 % zeigten einen Schichtwiderstand von 90 $\text{k}\Omega_{\square}$ [Boc+06]. Leitfähige Elektroden auf piezoelektrischem PVDF untersuchten Yu u. a.: MWCNT werden in einem mehrschrittigen Verfahren in einer wässrigen Lösung dispergiert und dann auf eine PVDF-Folie aufgebracht, siehe Abbildung 3.29. Die Elektrode besitzt einen Transmissionskoeffizienten von 87 %, eine Dicke von etwa 40 nm und einen Schichtwiderstand von 2,5 $\text{k}\Omega_{\square}$ [Yu+06].

Erstmals haben YUAN u. a. SWCNT als Elektrodenmaterial in dielektrischen Elastomeraktoren eingesetzt [Yua+08a]. Die SWCNT werden per Airbrush in verschiedenen Schichtdicken aufgesprüht [Yua+08b]. Die Schichtdicken reichen von 5 nm bis 250 nm mit Schichtwiderständen zwischen 20 $\text{k}\Omega_{\square}$ und 0,1 $\text{k}\Omega_{\square}$ [Yua+08a].

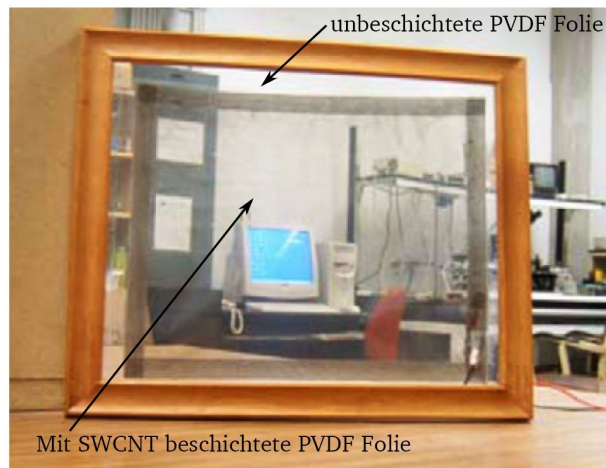


Abbildung 3.29: Transparente SWCNT-Elektrode auf PVDF-Folie nach Yu u. a. [Yu+06].

Die geringen Schichtdicken und hohen elektrischen Leitfähigkeiten gehen allerdings mit einigen Nachteilen und Schwierigkeiten einher. Wie alle Nanopartikel weisen Kohlenstoffnanoröhren und insbesondere SWCNT eine sehr große spezifische Oberfläche auf. Dies führt dazu, dass die Primärpartikel sehr stark agglomerieren. Die Kohlenstoffnanoröhren können daher immer nur mit hohem Aufwand in eine Lösung gebracht werden [Yu+06; Yua+08a]. Dispergierhilfsmittel wie SDS¹, PVP² oder Vorbehandlungen mit Säuren können dies unterstützen, führen aber oft zu einer verminderten Leitfähigkeit, da sich die Hilfsmittel um die Kohlenstoffnanoröhren legen oder die CNT auftrennen und verkürzen können [YRS05].

Einfluss der Materialien auf das Betriebsverhalten der Aktoren

Es gibt Hinweise darauf, dass das Elektrodenmaterial Einfluss auf die elektrische Durchbruchfestigkeit des Dielektrikums hat. In Abschnitt 3.1.1 wurde erläutert, dass es zum plötzlichen elektrischen Durchschlag kommt, wenn Ladungsträger aus der Elektrode austreten und durch Stoßionisation und Erwärmung immer mehr Ladungsträger entstehen. Es ist also zu erwarten, dass die Freisetzung von Elektronen materialabhängig ist. YUAN u. a. zeigten, dass Aktoren mit Elektroden aus zwei verschiedenen CNT-Materialien unterschiedlich lange stabil mit einer Spannung beaufschlagt werden können. Die Stabilität konnte durch Abdecken der Elektroden mit einem dielektrischen Öl wesentlich verbessert werden. In diesem Fall werden Corona-Entladungen zwischen den mikroskopischen Kohlenstoffnanoröhren vermieden, die durch Plasmabildung und Hitze das Dielektrikum punktuell zerstören.

CARPI u. a. haben ähnliche Versuche mit drei verschiedenen graphitbasierten Elektrodenmaterialien und einer Elektrolytlösung durchgeführt und sehr unterschiedliche Durchbruchfeldstärken und Kapazitäten für ein bestimmtes Dielektrikum beobachtet [Car+03]. Während die Durchbruchfeldstärke auf ähnliche Effekte wie bei den CNT-Elektroden zurückzuführen sind, unterstellen CARPI u. a. eine inhomogene Ladungsverteilung innerhalb der verschiedenen Elektroden. Eine inhomogene Ladungsverteilung kann auch von der transparenten CNT-Elektrode von BOCHAROVA u. a. erwartet werden. Die Autoren schätzen aufgrund der geringen CNT-Konzentration in der aufgetragenen Lösung, dass lediglich 5 % bis 15 % der Elektrodenfläche tatsächlich mit Kohlenstoffnanoröhren belegt sind.

¹ Natriumlaurylsulfat, (engl.: sodium dodecyl sulfate)

² Polyvinylpyrrolidon

Im folgenden Abschnitt wird daher geklärt, ob mit einer deutlichen Herabsetzung der effektiven Feldstärke zwischen den Elektroden gerechnet werden muss, wenn stark anisotrope Materialien wie Kohlenstoffnanoröhren als Elektrodenmaterial für dielektrische Elastomeraktoren verwendet werden.

3.2.2 Nichthomogene Elektroden

Eine der herausragenden Eigenschaften der oben vorgestellten Kohlenstoffnanoröhren ist das extreme Verhältnis von Länge zu Durchmesser. Die genannten Beispiele von CNT-Elektroden zeigen, dass sehr dünne leitfähige Schichten herstellbar sind. Die geringe Dicke zeigt sich in den Beispielen an der durchaus beachtlichen optischen Transparenz der Schichten. Für eine makroskopisch durchgängig leitfähige Schicht bedarf es offensichtlich keiner kompakten Schicht aus Kohlenstoffnanoröhren. Es stellt sich daher die Frage, ob die geringe Flächenbeladung mit leitfähigem Material nicht zulasten des elektrostatischen Druckes in einem Elastomeraktor geht.

Ausgangspunkt und Referenzgröße ist eine Anordnung mit zwei ideal leitfähigen, geschlossenen Elektroden der Breite b , einem Plattenabstand d und einer Tiefe l , die entlang der y -Richtung von Abbildung 3.30 ausgerichtet ist. Deren Kapazität C_{ideal} wird als ideal angenommen:

$$C_{\text{ideal}} = \frac{Q}{U} \quad \text{oder} \quad C_{\text{ideal}} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{b \cdot l}{d} \quad (3.32)$$

Die inhomogene Elektrode aus verteilten Kohlenstoffnanoröhren wird mit Hilfe von $2N$ diskreten Linienleitern mit einem Abstand a modelliert, sodass sich auch hier eine Breite $b = 2N \cdot a$ ergibt. Abbildung 3.30 zeigt den Aufbau dieses Modells. In y -Richtung seien die Leiter unendlich lang ausgedehnt.

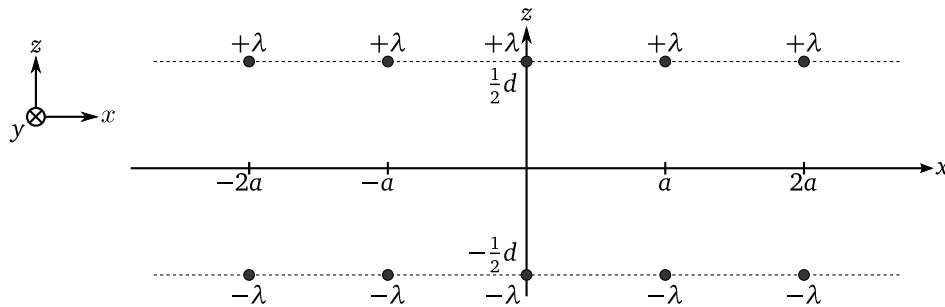


Abbildung 3.30: Modellierung einer Elektrode aus faserförmigem Material mit Hilfe verteilter Linienladungen λ .

Im Vergleich zu den Abmessungen einer Kohlenstoffnanoröhre können die Elektroden im Elastomeraktor tatsächlich als unendlich ausgedehnt angesehen werden. Da es in diesem Modell keine Querverbindungen zwischen den Linienleitern gibt, wird die tatsächliche Kapazität unterschätzt und das Ergebnis stellt die untere Schranke der Kapazität dar.

Ausgehend von der Definition der idealen Kapazität C_{ideal} in Gleichung (3.32) folgt für den Kapazitätsbelag C' in y -Richtung entlang der Tiefe der Elektroden:

$$C' = \frac{C}{l} = \frac{Q}{lU} = \frac{\lambda}{U} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{Q}{l} \quad (3.33)$$

Die noch unbekannte Größe in dieser Gleichung ist die Spannung U , die im folgenden hergeleitet wird.

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Potenzialdifferenz U sind die MAXWELLSchen-Gleichungen. Demnach ist eine Ladungsverteilung $\rho(\mathbf{x})$ Ursache für die Divergenz der Verschiebungsdichte \mathbf{D} :

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho(\mathbf{x}) \quad (3.34)$$

In der Integralschreibweise lässt sich diese Formel in der Form

$$\oint_A \mathbf{D} dA = \iiint_V \rho(\mathbf{x}) dV \quad (3.35)$$

darstellen. Anstelle der dreidimensional verteilten Ladung ρ soll die Betrachtung hier für die Lini-
enladung λ durchgeführt werden. Daher wird statt der geschlossenen Fläche A in Gleichung (3.35) nur noch der den Linienleiter umgebende Umfang berücksichtigt:

$$\lambda = \int_0^{2\pi} \mathbf{D} r d\varphi \quad (3.36)$$

Somit folgt für die Verschiebungsdichte \mathbf{D} bzw. die elektrische Feldstärke \mathbf{E} :

$$\mathbf{D} = \frac{\lambda}{2\pi r} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{E} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} \quad (3.37)$$

Betrachtet man eine einzelne Linienladung in ihrer nächsten Umgebung, so besitzt die Verschiebungsdichte aufgrund der Achsensymmetrie der Linienladung ausschließlich Anteile in radialer Richtung:

$$\mathbf{D} = D \mathbf{e}_r \quad (3.38)$$

Die elektrische Spannung U in Gleichung (3.33) ergibt sich als Differenz zweier Potenziale, die durch den bzw. mehrere Linienleiter verursacht werden:

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi(\mathbf{r}_\infty) - \int_{r_0}^r \mathbf{E}(r) dr \quad (3.39)$$

Mit Gleichung (3.37) gilt für das Integral:

$$\int_{r_0}^r \mathbf{E}(r) dr = \int_{r_0}^r \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{r_0} \quad (3.40)$$

Das Potenzial ist o. B. d. A. so definiert, dass es in unendlich großem Abstand verschwindet:

$$\Phi(\mathbf{r}_\infty) = 0 \quad (3.41)$$

Gleichung (3.39) vereinfacht sich hierdurch zu:

$$\Phi(\mathbf{r}) = -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{r_0} \quad (3.42)$$

Für die regelmäßige Anordnung der Linienleiter aus Abbildung 3.30 können die Potenziale der einzelnen Linienleiter superponiert werden. Entsprechend der Abbildung 3.31 gilt für die Abstände r folgender Zusammenhang [Wei08]: \mathcal{P} beschreibt den aktuellen Beobachtungspunkt, für den das resultierende Potenzial berechnet wird. Der Ortsvektor dieses Beobachtungspunktes lautet:

$$\mathbf{p} = x \mathbf{e}_x + z \mathbf{e}_z \quad (3.43)$$

Die Abstände r_0 entsprechen den Beträgen der Ortsvektoren der einzelnen Linienleiter:

$$\mathbf{r}_{0,i}^+ = ia \mathbf{e}_x + \frac{d}{2} \mathbf{e}_z \quad (3.44a)$$

$$\mathbf{r}_{0,i}^- = ia \mathbf{e}_x - \frac{d}{2} \mathbf{e}_z \quad (3.44b)$$

Aus dem geschlossenen Vektorzug

$$\mathbf{p} = \mathbf{r}_{0,i}^+ + \mathbf{r}_i \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{p} = \mathbf{r}_{0,i}^- + \mathbf{r}_i \quad (3.45)$$

ergibt sich damit für die Abstände der Linienleiter vom Beobachtungspunkt \mathcal{P} :

$$\mathbf{r}_{0,i}^+ = \mathbf{p} - \mathbf{r}_i \Rightarrow \mathbf{r}_i^+ = (x - ia) \mathbf{e}_x + \left(z - \frac{d}{2}\right) \mathbf{e}_z \quad (3.46a)$$

$$\mathbf{r}_{0,i}^- = \mathbf{p} - \mathbf{r}_i \Rightarrow \mathbf{r}_i^- = (x - ia) \mathbf{e}_x + \left(z + \frac{d}{2}\right) \mathbf{e}_z \quad (3.46b)$$

Für das Potenzial der Linienleiter ergibt die Superposition:

$$\Phi(\mathbf{p}) = \sum_{i=-N}^N -\frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_i^+}{r_{0,i}^+} + \sum_{i=-N}^N -\frac{-\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_i^-}{r_{0,i}^-} \quad \text{mit} \quad N = \frac{b}{a} \quad (3.47)$$

Durch die Wahl des Ursprungs \mathcal{O} als Bezugspunkt für die Potenziale der Linienleiter sind die Abstände zweier Linienleiter auf der positiven und negativen Elektrode jeweils gleich, siehe Gleichungen (3.44):

$$|\mathbf{r}_{0,i}^+| = |\mathbf{r}_{0,i}^-| \quad (3.48)$$

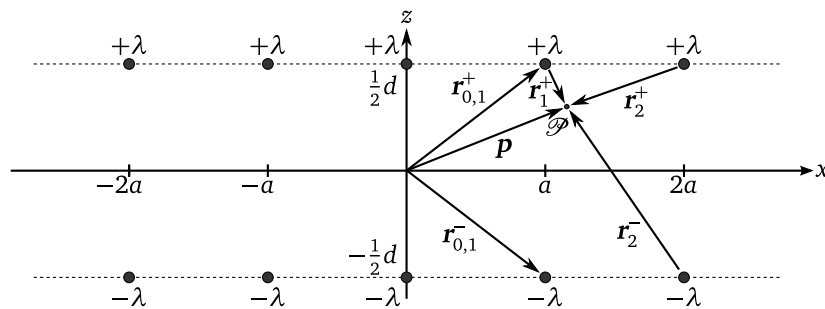


Abbildung 3.31: Beobachtungspunkt \mathcal{P} und Ortsvektoren zu den Linienladungen.

Somit gilt für Gleichung (3.47):

$$\begin{aligned}\Phi(\mathbf{p}) &= \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \sum_{i=-N}^N \ln \frac{r_{0,i}^+ r_i^-}{r_i^+ r_{0,i}^-} \\ &= \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \sum_{i=-N}^N \ln \frac{r_i^-}{r_i^+}\end{aligned}$$

Mit den Abständen r der Linienleiter aus Gleichung (3.46) folgt für das Potenzial:

$$\Phi(\mathbf{p}) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \sum_{i=-N}^N \ln \frac{\sqrt{(x - ia)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2}}{\sqrt{(x - ia)^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2}} \quad (3.49)$$

Gleichung (3.49) erlaubt es, die Potenzialverteilung um die CNT-Elektroden für verschiedene Leiterabstände a darzustellen. Abbildung 3.32 zeigt die Potenzialverteilung entlang der x -Achse, für Abstände $a_1 = 10 \mu\text{m}$ und $a_2 = 1 \mu\text{m}$. Bezogen auf den angenommenen Durchmesser von MWCNT $D_{\text{CNT}} \approx 20 \text{ nm}$ bedeutet dies ein Abstand-Durchmesser-Verhältnis a/D_{CNT} von 200 bzw. 20.

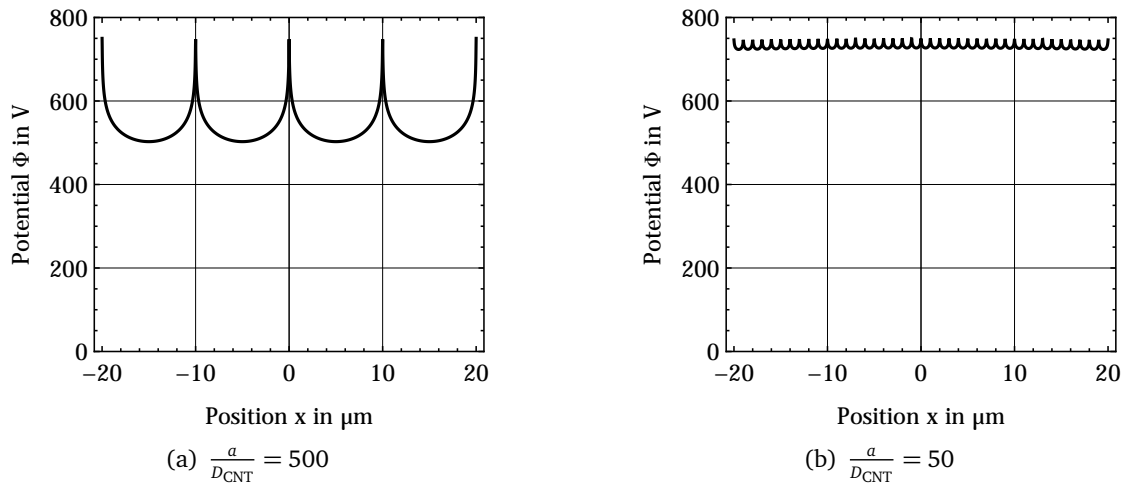


Abbildung 3.32: Potenzialverteilungen entlang der x -Achse für unterschiedliche Leiterabstände a .

Für beide Beispiele sind die Ladungsbeläge λ so definiert, dass sich am Punkt $\mathcal{P} = (0, d/2)$ ein Potenzial von 750 V ergibt. Dennoch zeigen die beiden Diagramme deutlich das Problem inhomogener Elektroden. Ist der Abstand zwischen den leitfähigen Strukturen zu groß, bricht das Potenzial zwischen den Linienladungen deutlich ein.

Diese Inhomogenität wird in den Konturdiagrammen der Abbildung 3.33 noch deutlicher. Sie zeigen die Potenzialverteilung in der zu den Elektroden orthogonalen Ebene. Die ersten beiden Diagramme zeigen das Potenzial in einem Ausschnitt um die obere Elektrode. Die unteren Diagramme zeigen eine Übersicht über beide Elektroden. Hier ist zu erkennen, dass die Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden für die dichtere Elektrodenbelegung mit $a/D_{\text{CNT}} = 50$ wesentlich höher ist.

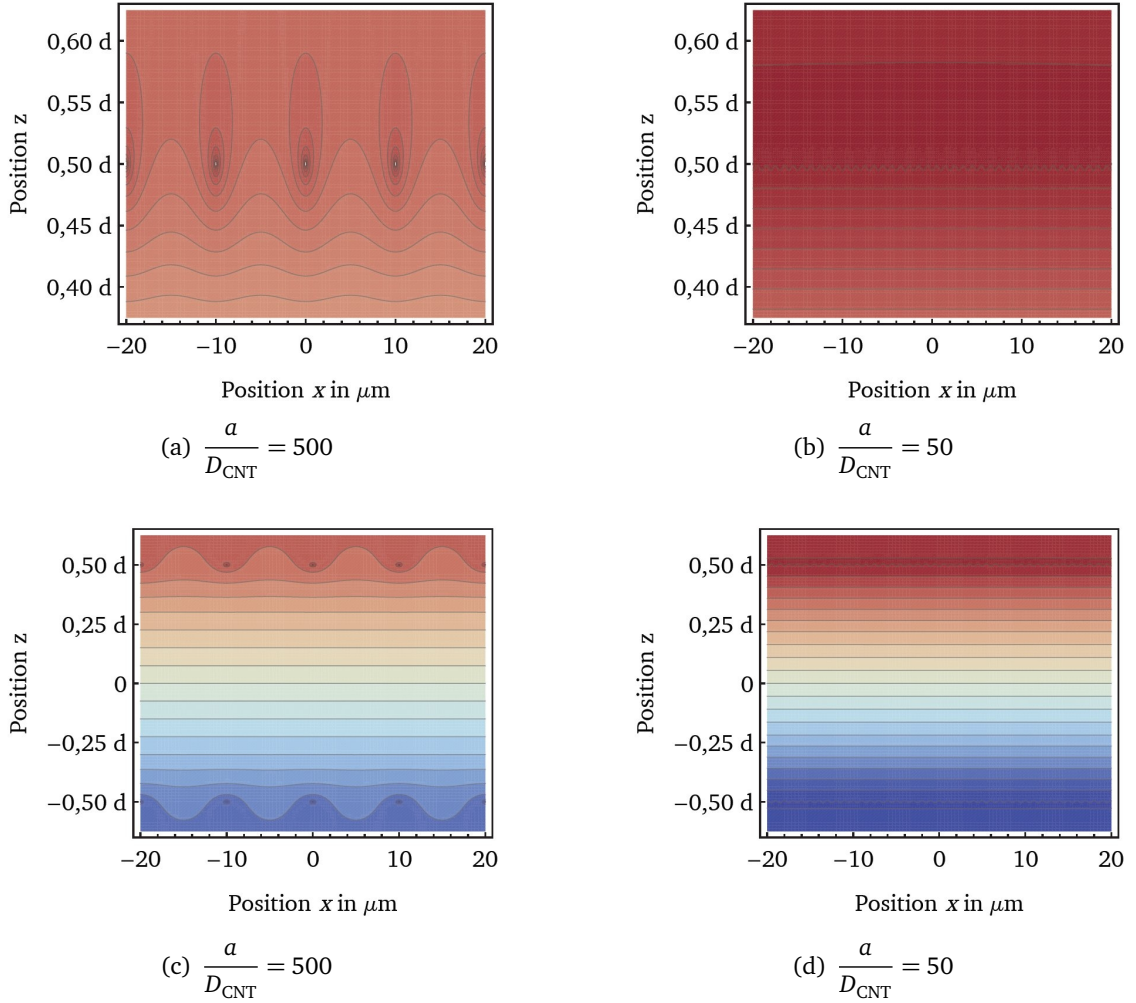


Abbildung 3.33: Potenzialverteilungen in der xz -Ebene für zwei unterschiedliche Verhältnisse von Leiterabstand a zu Leiterdurchmesser D_{CNT} . Die obere Reihe zeigt Ausschnitte im Bereich der oberen Elektrode, die untere Seite zeigt eine Übersicht, die beide Elektroden umfasst. Die Farbskalierung gilt für alle vier Diagramme.

Um die Spannung U zur Bestimmung der Kapazität in Gleichung (3.33) zu bestimmen, wird die Potentialdifferenz zwischen den oberen und unteren Linienleitern bestimmt. Aufgrund der symmetrischen Anordnung gilt $\Phi(\mathbf{p}_1) = -\Phi(\mathbf{p}_2)$ und es folgt für die Potentialdifferenz:

$$U = \Phi(\mathbf{p}_1) - \Phi(\mathbf{p}_2) = 2\Phi(\mathbf{p}_1) \quad (3.50)$$

Die Ladung Q zur Berechnung des Kapazitätsbelags in Gleichung (3.33) ergibt sich aus der Elektrodenbreite b , dem Betrag einer Linienladung λ und deren Abstand a zueinander:

$$Q = \lambda \frac{b}{a} \quad (3.51)$$

Für den Kapazitätsbelag selbst gilt damit:

$$C' = \frac{\lambda \frac{b}{a}}{U} = \frac{\lambda b}{2a\Phi(\mathbf{p}_1)} \quad (3.52)$$

Für den Wert des Potenzials $\Phi(\mathbf{p}_1)$ lässt sich Gleichung (3.49) einsetzen und es folgt

$$C' = \frac{\pi \epsilon b}{a \sum_{i=-N}^N \ln \frac{\sqrt{(x - ia)^2 + \left(z + \frac{d}{2}\right)^2}}{\sqrt{(x - ia)^2 + \left(z - \frac{d}{2}\right)^2}}} \quad \text{mit } x, z \in \text{Leiteroberfläche} \quad (3.53)$$

Die beiden Punkte \mathcal{P}_1 und \mathcal{P}_2 liegen direkt auf der Oberfläche eines Linienleiters. Es gilt daher für die Koordinaten x und z

$$x = 0 \quad (3.54a)$$

$$z = \frac{1}{2}d \pm r_{\text{CNT}} \quad (3.54b)$$

und es folgt für Gleichung (3.53):

$$C' = \frac{\pi \epsilon b}{a \sum_{i=-N}^N \ln \sqrt{\frac{(-ia)^2 + (d - r_{\text{CNT}})^2}{(-ia)^2 + r_{\text{CNT}}^2}}}$$

Der Abstand der Elektroden d ist wesentlich größer als der Durchmesser eines CNT-Leiters. Für $d \gg r_{\text{CNT}}$ gilt schließlich für den Kapazitätsbelag:

$$C' = \frac{\pi \epsilon b}{a \sum_{i=-N}^N \ln \sqrt{\frac{(-ia)^2 + d^2}{(-ia)^2 + r_{\text{CNT}}^2}}} \quad (3.55)$$

Der Ausdruck im Nenner kann für $N \rightarrow \infty$ noch weiter vereinfacht werden, siehe Anhang ?? [Wei08]:

$$C' = \frac{2\pi \epsilon b}{a \ln \frac{\sinh\left(\pi \frac{d}{a}\right)}{\sinh\left(\pi \frac{r}{a}\right)}} \quad (3.56)$$

Abbildung 3.34 zeigt die auf die ideale Kapazität eines Plattenkondensators bezogene Kapazität eines Kondensators mit linienartigen Elektroden. Bis zu einem Abstand der dem hundertfachen des Leiterdurchmessers entspricht, verhalten sich die Kapazitäten praktisch gleichartig. Insgesamt zeigen beide Diagramme, dass der Abstand a nur einen geringen Einfluss auf die Verringerung der Kapazität hat.

Demgegenüber zeigt das Diagramm in Abbildung 3.35, dass der Elektrodenabstand d einen wesentlich größeren Einfluss auf das Kapazitätsverhältnis hat. Um mehr als 90 % der maximal möglichen Kapazität zu erreichen, darf der Abstand der Linienleiter höchstens ein Zehntel des Plattenabstands betragen.

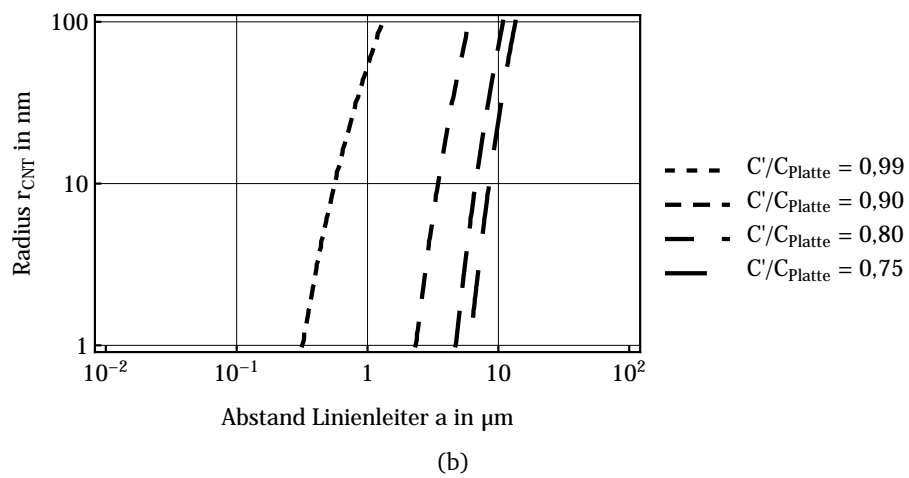
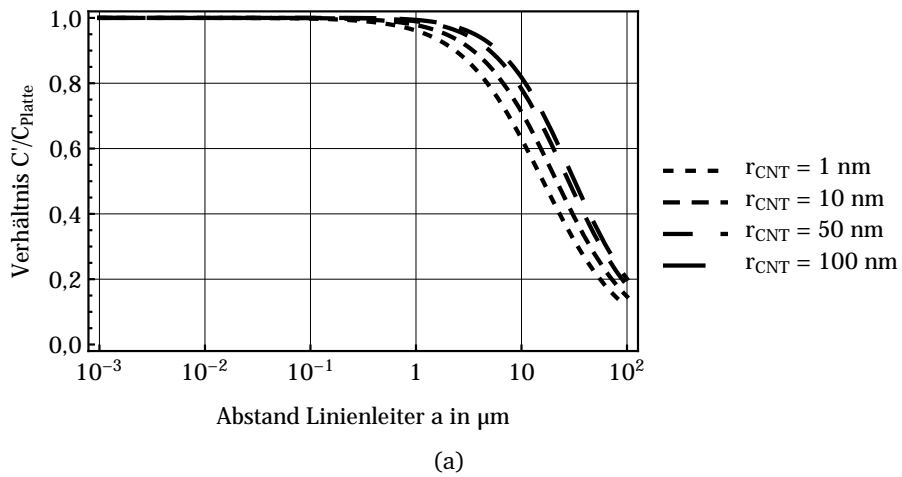


Abbildung 3.34: Vergleich des Verhältnisses der Kapazitäten von inhomogenem Elektrodenpaar C' und Plattenkondensator C_{Platte} . (a) r_{CNT} als Scharparameter; (b) r_{CNT} als Parameter der y-Achse.

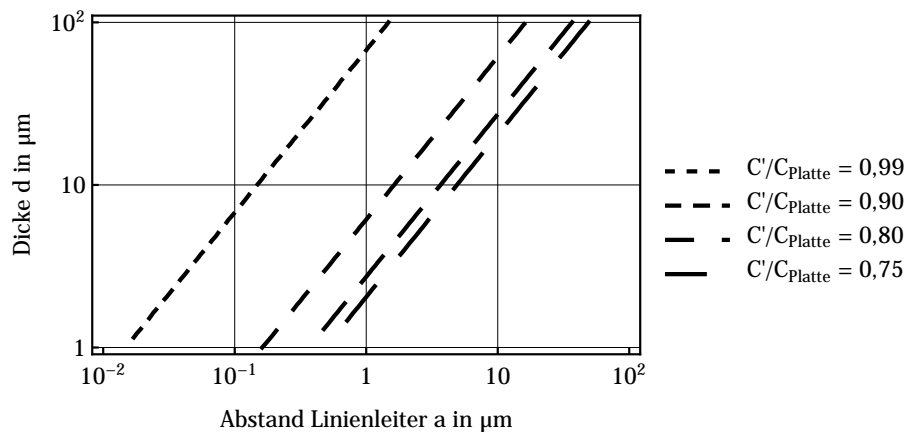


Abbildung 3.35: Kapazitätsverhältnis von inhomogenem Elektrodenpaar C' und Plattenkondensator C_{Platte} . Der CNT-Radius steht in einem festem Verhältnis mit dem Abstand a : $r = \frac{1}{50}a$.

3.3 Herstellungstechnologie

Die in dieser Arbeit genutzte Technologie zur Herstellung dielektrischer Stapelaktoren basiert auf der von JUNGMAHN entwickelten Herstellungstechnik [Jun04]. Für die Ausführung des in Abbildung 2.5 bereits vorgestellten dreischrittigen Prozesses wurde bereits von JUNGMAHN ein automatisierter Prozess entwickelt, dessen Struktur in Abbildung 3.36 dargestellt ist.

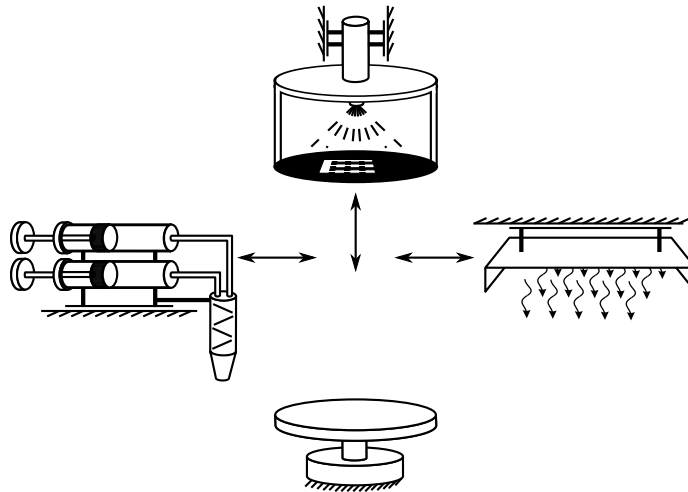


Abbildung 3.36: Sternförmige Struktur der automatisierten Herstellung nach JUNGMAHN.

Zentrales Element ist dort die Schleudereinrichtung, mit der die dielektrischen Elastomerschichten mit einer Dicke von etwa $50\text{ }\mu\text{m}$ hergestellt werden. Auf dem Schleuderteller wächst von Prozessiteration zu Prozessiteration der Stapelaktor auf. Sternförmig um den Schleuderteller sind Module zur Dosierung des unvernetzten Elastomers, zur Vernetzungsbeschleunigung sowie zum Aufbringen der Elektroden angeordnet.

Die Sternstruktur erlaubt einen sehr kompakten Aufbau. Sie bietet aber kaum Möglichkeiten, weitere Module zur Evaluation alternativer Prozesse in die bestehende Struktur zu integrieren.

Daher wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine vielseitigere Prozess- und Maschinenstruktur entwickelt. Wie in Abbildung 3.37 dargestellt ist, sind hier die Prozessmodule linear angeordnet. Auch hier dient ein Schleuderteller als Substrat für den Stapelaktorbau. Im Gegensatz zur Vorgängerversion wird der Teller von Prozessmodul zu Prozessmodul verfahren. In die lineare Struktur können wesentlich einfacher zusätzliche Module für alternative Herstellungsmethoden oder Materialien aufgenommen werden.

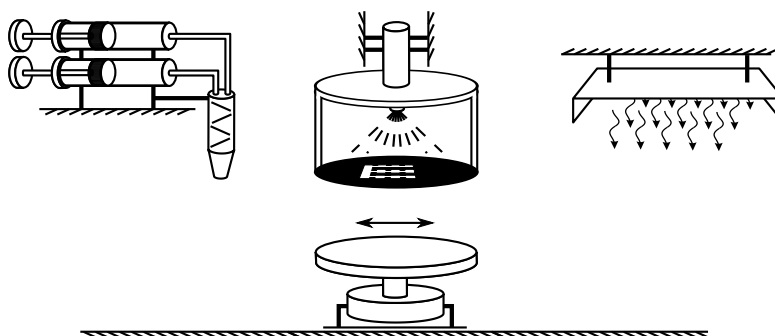


Abbildung 3.37: Lineare Struktur der verbesserten Herstellung nach LOTZ und MATYSEK.

Folgende Prozessmodule sind vorhanden:

- Schichtherstellung (Schleuderteller)
- Elastomerdosierung, Produktivsystem mit Standardmaterial
- Elastomerdosierung, Experimentalsystem für Alternativmaterialien
- Vernetzungsbeschleunigung
- Elektrodenherstellung, Produktivsystem mit Standardmaterial
- Elektrodenherstellung, Experimentalsystem für Alternativmaterialien
- Schichtwiderstandsmessung
- Prozessüberwachung: Temperatur, Feuchte, Steuer- und Prozessdrücke

Die modulare Struktur findet sich in allen Ebenen der Maschine wieder und ist in Abbildung 3.38 dargestellt. Die mechanischen Aufbauten der Prozessmodule werden von einem Grundgerüst getragen, das auch die Prozessinfrastruktur in Form elektrischer Energie, Druckluft und Stickstoff zur Verfügung stellt. Jedes Modul verfügt über eine eigene Steuerelektronik, die zentral über den Steuerrechner angesprochen wird, aber auch eine Benutzerschnittstelle zur manuellen Bedienung beinhaltet. Auf dem Steuerrechner verwaltet ein Steuerprogramm den zentralen Prozessablauf. Letzterer ist frei konfigurierbar und greift auf Programmmodule zu, die für jedes Prozessmodul existieren. Es ist daher keinerlei Änderung am Steuerprogramm notwendig, um ein Prozessmodul in die Maschine einzufügen oder zu entnehmen.

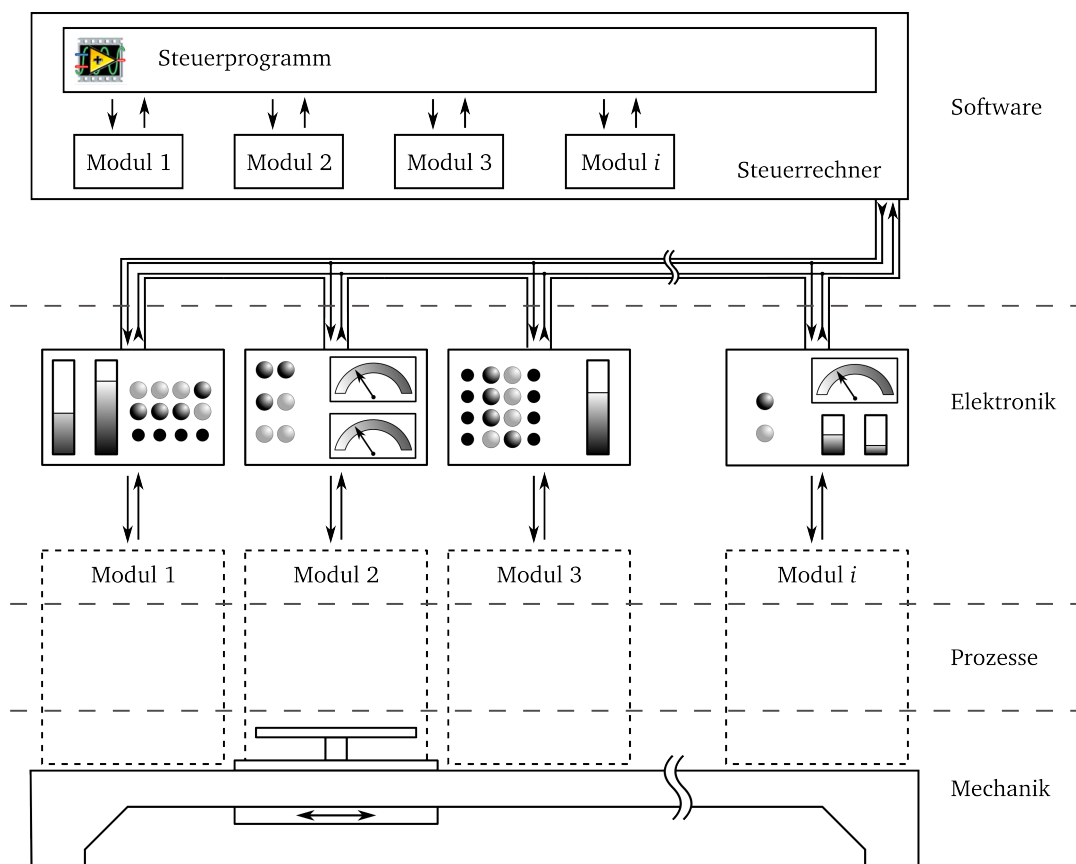


Abbildung 3.38: Modulare Struktur des Maschinenaufbaus auf Mechanik-, Prozess-, Elektronik- und Software-Ebene.

3.3.1 Herstellung der dielektrischen Schicht

Die wichtigste Anforderung an diesen Prozessschritt ist eine reproduzierbare homogene Schichtdicke, die sich auch während der Herstellung von 50 und mehr Schichten nicht verändert. Die verschiedenen Einflussgrößen sowie die Ermittlung der speziellen Prozessparameter wurden im Rahmen einer anderen Arbeit durch MATYSEK ausführlich untersucht [Mat09]. Hier soll nur auf die wesentlichen Zusammenhänge eingegangen werden, die für das Verständnis des Schleuderprozesses notwendig sind.

Ausgangspunkt für die Vorhersage der Schichtdicke ist die Schleudertheorie nach EMSLIE, BONNER und PECK [EBP58]. Für eine NEWTON'sche Flüssigkeit, deren Viskosität η nicht von der Scherrate τ abhängt, besteht während des Schleudervorgangs ein Kräftegleichgewicht zwischen der Zentrifugalkraft und der Scherung innerhalb der geschleuderten Flüssigkeit:

$$-\eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \rho \omega^2 r \quad (3.57)$$

Das Kräftegleichgewicht hängt von der Drehzahl ω , den Materialparametern Dichte ρ und Viskosität η sowie dem Gradienten zweiter Ordnung der radialen Geschwindigkeit v entlang der Rotationsachse z ab. Um einen Ausdruck für die momentane Schichtdicke d zu erhalten, wird der Volumenstrom q_v in radialer Richtung betrachtet:

$$q_v = \int_0^d v dz = \frac{\rho \omega^2 r d^3}{3\eta} \quad (3.58)$$

EMSLIE, BONNER und PECK zeigten, dass mit Hilfe dieser beiden Ansätze die folgende allgemeine Lösung der Schichtdickenverteilung $d(r)$ gefunden werden kann. Hier soll nur das Ergebnis genannt werden, die Herleitung ist in [EBP58] beschrieben:

$$d(r) = \frac{d_0(r)}{\sqrt{1 + 4Kd_0(r)^2 t}} \quad \text{mit} \quad K = \frac{\rho \omega^2}{3\eta} \quad (3.59)$$

Wichtige Randbedingungen für diese Lösung sind eine konstante Rotationsgeschwindigkeit ω , das newtonsche Verhalten des aufzuschleudernden Materials sowie eine konstante Dichte ρ und Viskosität η . Im allgemeinen Fall, dem Schleudern von Photoresisten und anderen gelösten Polymeren ist dies nicht selbstverständlich. Die verwendeten Lösungsmittel sind oft schnell flüchtig und verändern Dichte und Viskosität tatsächlich während des Schleudervorgangs.

Im hier betrachteten Fall der unvernetzten Elastomervorstufen liegen keine Lösungsmittel vor, die die Dichte verändern könnten. Von einer Änderung der Viskosität ist während der kurzen Zeit zwischen Mischen und Dosieren der Komponenten und dem Ende des Schleudervorgangs ebenfalls nicht auszugehen. Aufgrund der langen Molekülketten und der hohen Scherrate während des Schleudervorgangs kann allerdings nicht von einer newtonschen Flüssigkeit ausgegangen werden. Da auch die genaue Höhenverteilung des Elastomers zu Schleuderbeginn nicht bekannt ist, wurde folgende Funktion zur Vorhersage der Schichtdicke d in Abhängigkeit von Drehzahl, Dauer und Viskosität empirisch ermittelt [Mat09]:

$$d(\omega, t, \eta) = \sqrt{\frac{\rho_{\text{ref}} \cdot \eta}{\eta_{\text{ref}} \cdot \rho}} \cdot \frac{354440,47 \mu\text{m}}{t^{0,38} \cdot \omega^{1,056}} - 1,83 \mu\text{m} \quad (3.60)$$

Gleichung (3.60) wurde für das Referenzmaterial Elastosil® P7670 ermittelt und mit zwei weiteren Materialien überprüft. Die Abweichung dieses empirischen Modells für die hergestellten Dielektrikumsschichten ist kleiner als 3 % [Ham07].

Der Vergleich dieser Gleichung mit dem Modell von EMSLIE, BONNER und PECK zeigt, dass die experimentellen Ergebnisse gut mit der Theorie in Gleichung (3.59) übereinstimmen. Die Rotationsgeschwindigkeit ω weist den vorhergesagten reziproken Einfluss auf, der Exponent der Schleuderzeit t ist mit 0,38 etwas kleiner als in der Theorie.

Das Diagramm in Abbildung 3.39(a) zeigt die Abhängigkeit der Schichtdicke von Drehzahl und Viskosität, in Abbildung 3.39(b) ist die Abhängigkeit der Schichtdicke für Elastosil® P7670 von Drehzahl und Dauer dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit diesem Verfahren Schichtdicken in einem Bereich zwischen 100 μm und 5 μm hergestellt werden können.

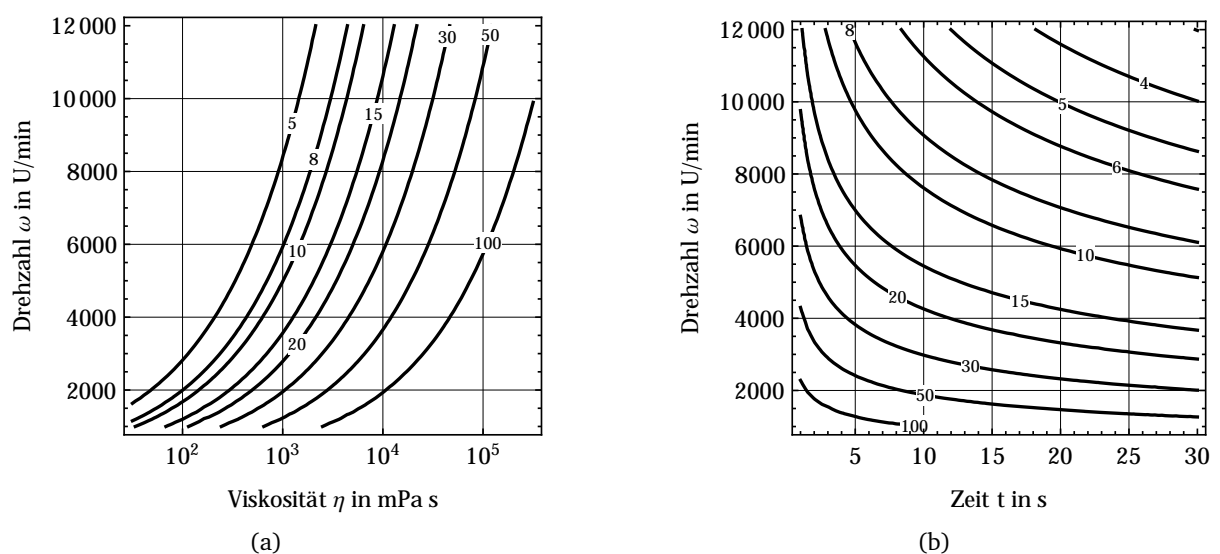


Abbildung 3.39: Abhängigkeit der Schichtdicke geschleuderter Elastomerfilme von (a) Drehzahl und Viskosität für $t = 15$ s; (b) Drehzahl und Zeit für $\eta = 1800$ mPa s. Die Linien kennzeichnen die Koordinaten konstanter Filmdicken für einen Bereich zwischen 3 μm und 100 μm .

3.3.2 Herstellung der Elektroden

Die Herstellung der Elektroden für die Stapelaktoren basiert ebenfalls auf dem von JUNGSMANN entwickelten Sprühprozess. In diesem Verfahren wird Graphitpulver durch eine Aufwirbelung fluidisiert, in einen Luftstrom eingebracht und durch eine Schlitzdüse versprüht, siehe Abbildung 3.40 [Jun04]. Als zwei wesentliche Nachteile dieses Verfahrens haben sich die Fluidisierung sowie die Schlitzdüse herausgestellt.

Die Menge der in den Luftstrom eingebrachten Graphitpartikel hängt sehr stark vom momentanen Füllstand des Graphitvorrates ab. Die tatsächlich auf der Elastomeroberfläche aufgebrauchte Graphitmenge wird zudem stark vom aktuellen Zustand der Ventile und der Schlitzdüse beeinflusst. Eine punktuelle Verunreinigung der Düse wird trotz der hohen Strömungsgeschwindigkeit nicht durch den Luftstrom selbst gereinigt. Vielmehr führt die Verunreinigung zu einem inhomogenen Sprühprofil und in der Folge zu einer ungleichmäßigen Graphitbeladung der Elektrodenfläche. In

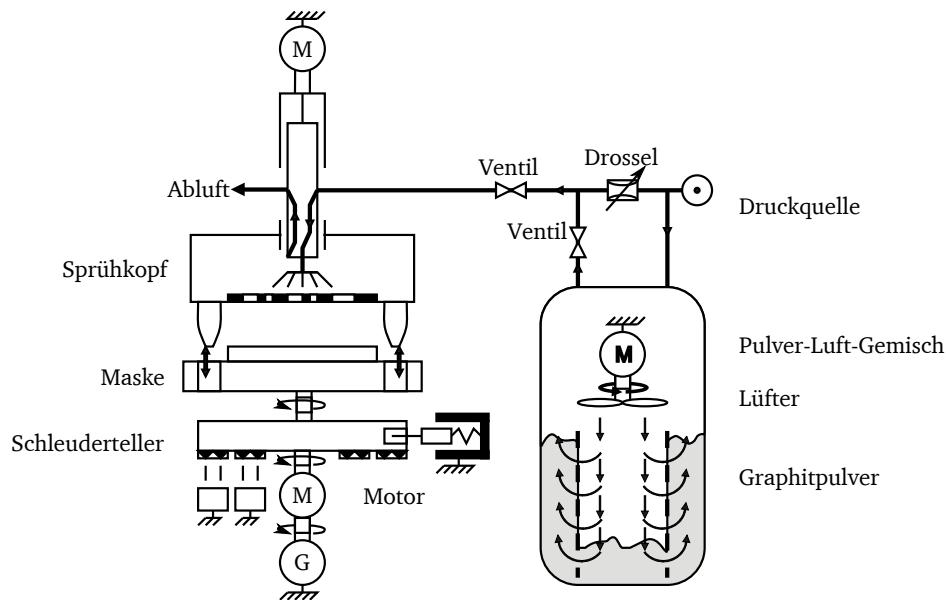


Abbildung 3.40: Schematische Darstellung der Elektrodenherstellung nach JUNGMAHN [Jun04]. Prozessparameter sind kursiv dargestellt.

einem automatisierten Prozess, in dem Aktoren mit bis zu 100 Schichten automatisiert hergestellt werden, hat dies eine sehr hohe Ausschussrate zur Folge.

Abbildung 3.41 zeigt die Struktur der verbesserten Elektrodenherstellung. Wesentliche Neuerungen sind die Vorhaltung des Elektrodenmaterials als Suspension sowie die Verwendung einer Zwei-Stoff-Düse. Dieses Verfahren besitzt zum einen eine geringere Anzahl von Prozessparametern, zum anderen können diese Parameter wesentlich besser definiert und kontrolliert werden. Insbesondere erlaubt die Verwendung einer Suspension eine genaue Kontrolle der gesprühten Partikelmenge über die abmessbare Partikelkonzentration im vorgehaltenen Flüssigkeitsvolumen.

Die Suspension wird in einer Punktdüse mit Hilfe der Zerstäubungsluft zerstäubt, ein zweiter Formierluftstrom formt den entstehenden runden Sprühkegel zu einem flachen Strahl, der die gesamte Aktorbreite bedeckt. Um die gesamte Aktorfläche zu beschichten, wird die Düse während des Sprühens linear verfahren.

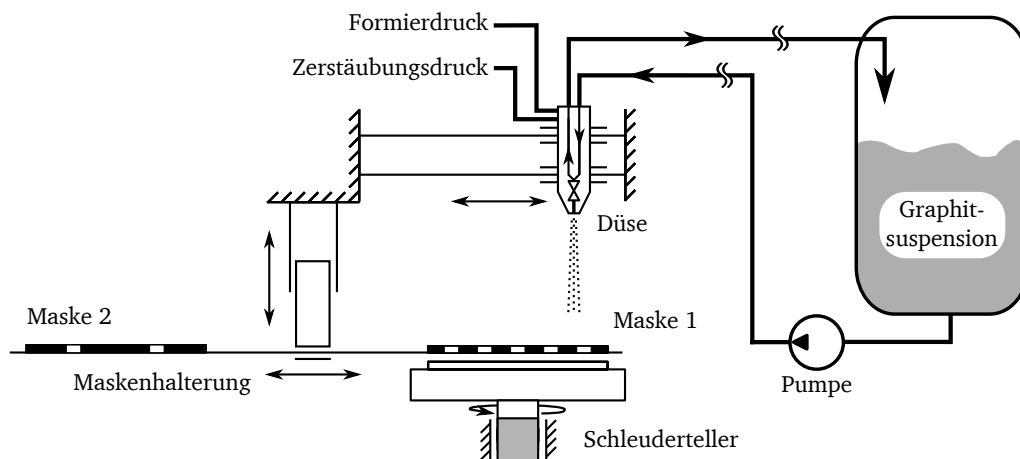


Abbildung 3.41: Schematische Darstellung der überarbeiteten Elektrodenherstellung.

Der gesamte in Abschnitt 3.3 dargestellte Herstellungsprozess ist für Elastomerkörper mit einem maximalen Durchmesser von 100 mm ausgelegt, wobei der derzeitige Standarddurchmesser 40 mm beträgt. Innerhalb dieser Fläche können Aktorelemente mit nahezu beliebiger Form hergestellt werden.

Abbildung 3.42 zeigt drei Beispiele von Elektrodengeometrien für unterschiedliche Anwendungen. Elektrode (a) ist eine großflächige Elektrode beispielsweise für die Ermittlung von Leerlaufauslenkung ohne Randeffekte. Das Elektrodenfeld (b) wird zur Erzeugung von Vibrationen genutzt, wie sie von MATYSEK entwickelt und untersucht werden [Mat09]. Eine Reihe von Einzelaktoren (c) ist ein Beispiel für die mögliche parallele Fertigung mehrerer Einzelaktoren oder für individuell ansteuerbare Aktoren wie sie in Kapitel 7 für die peristaltische Fluidförderung verwendet werden.

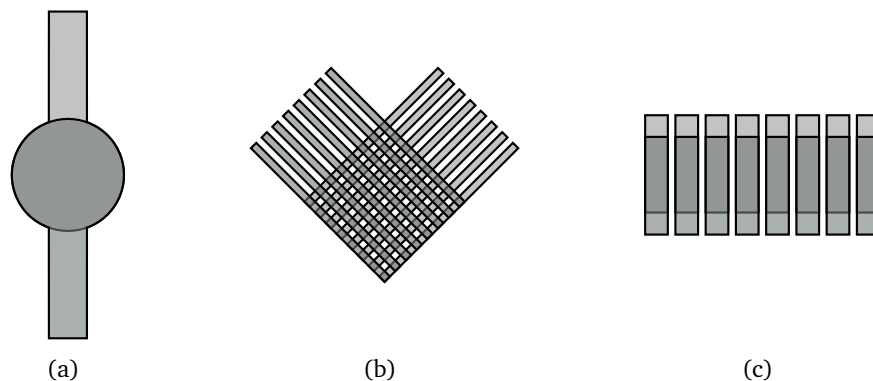


Abbildung 3.42: Beispiele für verschiedene Elektrodengeometrien: (a) Großflächiger Einzelaktor zur Charakterisierung; (b) Aktorfeld für verteilte Vibrationen; (c) Einzelaktoren zur individuellen Ansteuerung.

Bestimmung der Gleichmäßigkeit der leitfähigen Schicht

Diese drei Beispiele zeigen, dass für eine universelle Einsetzbarkeit der Herstellungstechnologie die Elektrode über die gesamte zur Verfügung stehende Fläche homogene Eigenschaften besitzen muss. Diese sind im einzelnen:

- Partikelgröße
- Partikelmenge
- Homogenität der Schicht
- elektrischer Grundwiderstand
- Dehnungsabhängigkeit des elektrischen Widerstandes

Das Zusammenspiel von Zerstäubungsdruck, Formierdruck und Düsenöffnung sowie der Geschwindigkeit, mit der die Düse über die Elastomeroberfläche bewegt wird, muss genau abgestimmt sein, um eine gleichmäßige Elektrodenqualität zu erreichen. Für die Parametrisierung des Sprühprozesses auf ein bestimmtes Material bedarf es daher Möglichkeiten, die hergestellte Schicht qualitativ, aber auch quantitativ zu bewerten.

Eine qualitative Beurteilung kann relativ einfach visuell vorgenommen werden. Bereits der erste optische Eindruck der beiden Elektrodenflächen in Abbildung 3.43 weist auf eine ungenügende Schichtqualität hin. Das linke Bild zeigt sehr unterschiedliche Größen von Partikeln, im rechten

Bild ist die Schichtdicke bzw. die Menge an aufgebrachtem Material in der Mitte wesentlich höher als am Rand.

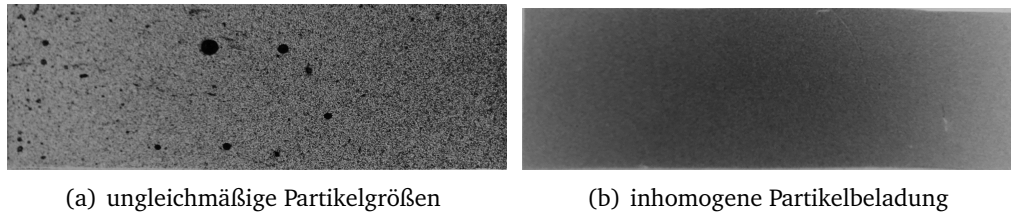


Abbildung 3.43: Gesprühte Elektroden mit ungenügender Gleichmäßigkeit.

Die Schwierigkeit in einer quantifizierten Beurteilung der ersten drei Punkte der obigen Aufzählung ist mit den stark unterschiedlichen geometrischen Dimensionen verbunden, die berücksichtigt werden müssen.

Auf der einen Seite interessieren die Partikeldurchmesser, die sich im Bereich zwischen $0,5\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m}$ bewegen. Im Falle des als Standardmaterial verwendeten Graphits NGS MF 2 haben die Partikel eine mittlere Größe von $2\ \mu\text{m}$.

Auf der anderen Seite steht eine maximale Fläche mit bis zu $100\ \text{mm}$ Durchmesser, auf die die Partikel gleichmäßig aufgetragen werden müssen.

Aber nicht nur die laterale Homogenität der Schicht muss gegeben sein. Es ist selbstverständlich, dass die Schichtqualität innerhalb der bis zu 100 Schichten eines Stapelaktors konstant sein muss. Darüber hinaus müssen für eine verlässliche und reproduzierbare Aktorfertigung aber auch die Eigenschaften in den zwanzig Aktoren einer Suspensionscharge reproduzierbar sein.

Die ersten drei Punkte werden daher mit Hilfe einer digitalen Bildverarbeitung der leitfähigen Schicht beurteilt, siehe Abbildung 3.43. Die verbleibenden beiden Qualitätsmerkmale der obigen Aufzählung können dann durch Messen des Schichtwiderstandes einer Sprühprobe ermittelt und quantitativ beurteilt werden.

Gleichmäßigkeit der Elektroden

Zur Überprüfung der Prozessqualität werden die Elektrodenmaterialien auf Silikonsubstrate gesprüht, die eine Dicke von $2\ \text{mm}$ aufweisen. Damit später der Schichtwiderstand gemessen werden kann, wird das Substrat maskiert. Alle Sprühproben besitzen dadurch eine Länge von $30\ \text{mm}$ und $10\ \text{mm}$ Breite. Der Sprühkopf wird während der Elektrodenherstellung in Richtung der Bitmap-Zeilen über das Substrat bewegt, siehe Abbildung 3.44.

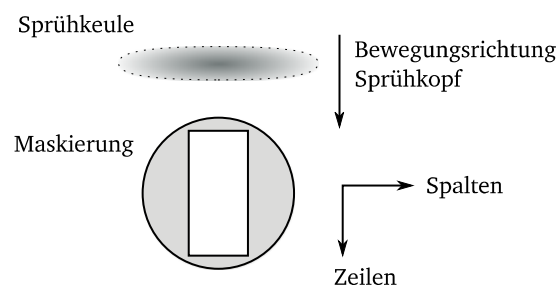


Abbildung 3.44: Bewegung des Sprühkopfes und Ausrichtung der Histogramme.

Zur Beurteilung werden Bilder der Sprühproben vor einer konstanten Hintergrundbeleuchtung aufgenommen. Dies gewährleistet, dass die Grundhelligkeit bei allen Proben gleich ist. Um auch den Einfluss von wechselndem Umgebungslicht so gering wie möglich zu halten, werden die Grauwerte der Bildpunkte anschließend auf die durchschnittliche Helligkeit des unbesprühten Silikonsubstrates normiert. Dieser unbesprühte Referenzbereich ist im oberen Teil der Abbildung 3.45 zu erkennen.

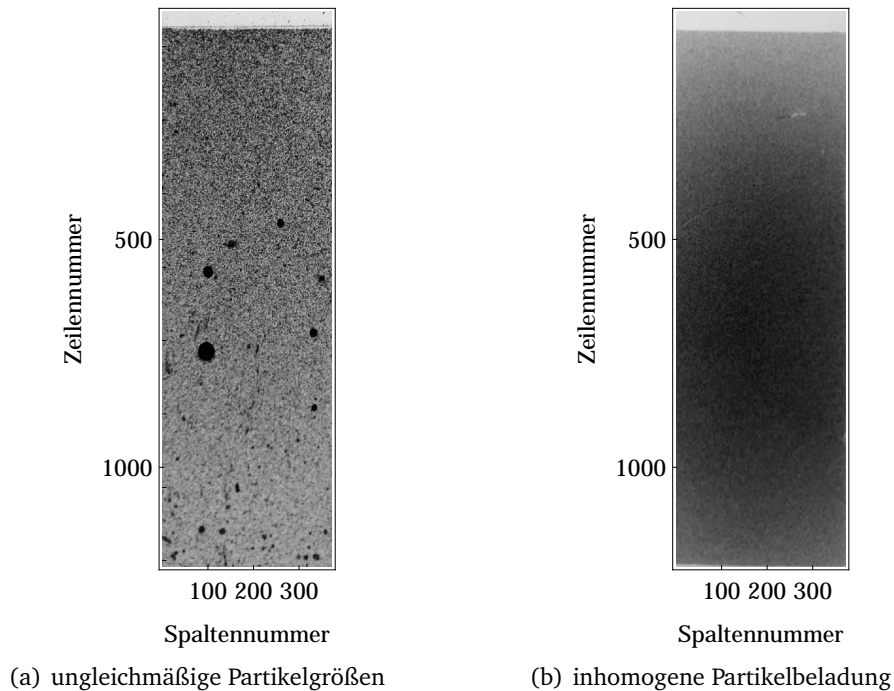


Abbildung 3.45: Gesprühte Elektroden mit ungenügender Gleichmäßigkeit.

Die Gleichmäßigkeit der Schicht lässt sich nun beurteilen, indem die Verteilung der Grauwerte in Histogrammen dargestellt wird. Zur Kontrolle des Sprühprozesses werden die Verteilungen für Zeilen und Spalten des Bitmap getrennt voneinander betrachtet. Nur wenn die Maxima der Histogramme in den Zeilen und Spaltendarstellungen auf einer Linie liegen, kann von einer optimalen Graphitschicht ausgegangen werden.

Abbildung 3.46 zeigt die Zeilen- und Spaltenhistogramme der Sprühproben aus Abbildung 3.45. Bezüglich der Herstellungsqualität können aus den Diagramme eine Reihe von Erkenntnissen gewonnen werden:

Die beiden Histogramme 3.46(a) und 3.46(b) zeigen eine sehr flache, dafür breit auslaufende Verteilung. Dies korrespondiert mit Abbildung 3.45(a), in der eine sehr ungleichmäßige Partikelgrößenverteilung zu erkennen ist. Die Helligkeitsverteilung in Histogramm 3.46(a) verläuft parallel zur Diagrammachse, es ist also keine Variation der Graphitmenge entlang der Spaltenrichtung zu erkennen. Dies spricht für eine gute Einstellung der Formierluft während des Sprühvorgangs.

Die Helligkeitsverteilung in Histogramm 3.46(b) konzentriert sich bei hohen Zeilennummern in Richtung hellen Grauwerten. Die Variation der Partikelgrößen nimmt also ab, gleichzeitig aber auch die Partikelbeladung insgesamt, da die Probe heller wird. Dies weist auf eine sinkende Graphitkonzentration während der Sprühdauer hin.

Ein ähnlicher Effekt ist auch in Histogramm 3.46(d) zu erkennen. Bei kleinen Zeilennummern bzw. zu Beginn des Sprühprozesses ist die Partikelkonzentration geringer und steigt dann an. Offensichtlich wird der Sprühkopf zu früh über das Substrat hinwegbewegt.

Insgesamt weisen die Histogramme 3.46(c) und 3.46(d) wesentlich schmalere Helligkeitsverteilungen auf. Auf der zugrundeliegenden Sprühprobe befinden sich daher wesentlich mehr Partikel der gleichen Größe.

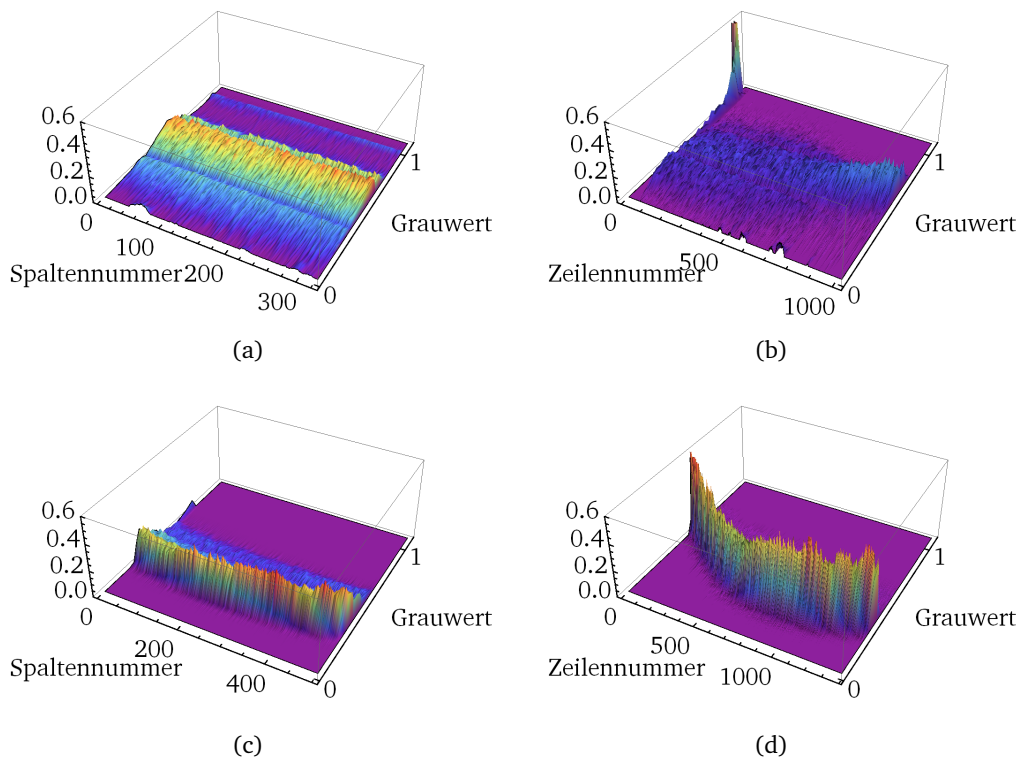


Abbildung 3.46: Darstellung der Elektrodenhistogramme in Spalten- und Zeilenrichtung. (a) und (b) stellen die Helligkeitsverteilungen von Abbildung 3.45(a) dar, (c) und (d) die Verteilungen von Abbildung 3.45(b). Die z-Achse zeigt jeweils die relative Häufigkeit des jeweiligen Grauwerts.

Grundwiderstand und Dehnungsabhängigkeit

Während die Gleichmäßigkeit vor allem ein Qualitätsmerkmal des Herstellungsprozesses ist, bestimmt der elektrische Grundwiderstand und die Dehnungsabhängigkeit direkt das elektromechanische Verhalten der Aktoren. Wie mit Gleichung (3.29) gezeigt wurde, kann ein Aktor mit Elektroden eines bestimmten Grundwiderstandes nur bis zu einer bestimmten Frequenz sinnvoll betrieben werden.

Der Widerstand der Elektroden ist proportional zur Schichtdicke der Elektroden. Aufgrund des pulverförmigen Materials ist es sehr schwierig, die Dicke der Elektroden direkt zu messen. Tastende Verfahren mit einem Oberflächenprofilometer (z.B. Veeco Dektak o. ä.) sind nur bedingt geeignet, da sie zum einen die leitfähige Schicht mit der Messspitze beschädigen, zum anderen besteht die Gefahr, dass das Messsystem durch die losen Partikel nichtreversibel verschmutzt wird.

Mit den Digitalaufnahmen kann ebenfalls keine absolute Dicke der Elektrode ermittelt werden. Da die Aufnahmen unter definierten Bedingungen entstehen, kann aber ein Vergleich von mehreren

Proben eines Materials erfolgen. So weisen die Intensitätsdiagramme in Abbildung 3.47 auf einen deutlichen Schichtdickenunterschied hin.

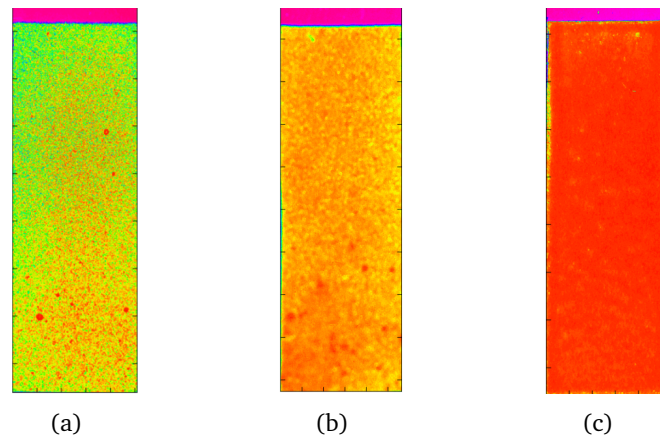


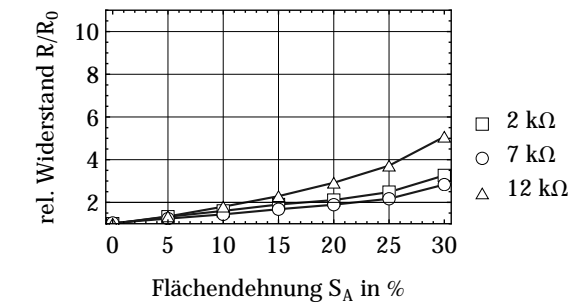
Abbildung 3.47: Intensitätsdiagramme dreier Elektroden mit unterschiedlichen Sprühparametern. Der violette Bereich ist die unbeschichtete Referenzfläche.

Die Dehnbarkeit der Elektroden ist für einen effizienten aktorischen Betrieb unerlässlich, da die Dickenstauchung zu einer lateralen Dehnung des Dielektrikums und damit der Elektrode führt. Desweiteren sind Elastomeraktoren im Vergleich zu anderen Festkörperaktoren sehr weich. Diese hohe strukturelle Flexibilität macht dielektrische Elastomeraktoren gerade für Anwendungen sehr interessant, in denen ein Benutzer mit den Aktoren interagiert. Während die Dehnungen aufgrund der Dielektrikumsdehnung im regulären Betrieb mit ca. 15 % verhältnismäßig gering sind, können durch Betasten, Befühlen oder Verbiegen der Aktoren örtlich wesentlich höhere Dehnungen der Elektroden auftreten.

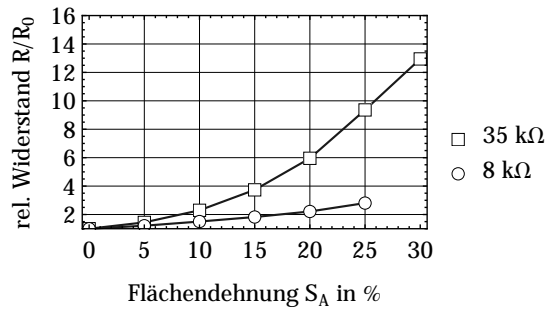
Die in dieser Arbeit intensiv untersuchten pulverförmigen Elektrodenmaterialien zeigen allesamt eine Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der aktuellen Dehnung. In den Diagrammen der Abbildung 3.48 sind die relativen Änderungen des elektrischen Widerstandes für verschiedene Elektrodendicken dargestellt. Bezugswert ist jeweils der Grundwiderstand der ungedehnten Schicht. Bemerkenswert ist, dass die drei untersuchten Materialien im betrachteten Dehnungsbereich lineare als auch exponentielle Verläufe zeigen. Besonders gut ist dies am Ruß Vulcan XC 72 und an den MWCNT Baytubes zu erkennen. Ausreichend dicke Elektroden weisen einen linearen Widerstandsverlauf in Abhängigkeit der Dehnung auf. Wird die Schichtdicke verringert, so zeigt sich eine minimale Schichtdicke, unterhalb derer kein elektrisch leitender Film mehr vorhanden ist. In diesem Fall liegen schlicht nicht mehr genügend Partikel vor, um eine homogen geschlossene Schicht zu bilden. Die Schicht reißt mit zunehmender Dehnung an immer mehr Stellen und es kommt zum exponentiellen Widerstandsverlauf.

Damit ergibt sich direkt ein Zielkonflikt für die Elektrodenherstellung: zum einen soll die Elektrode möglichst dünn sein, damit sie die Dickenänderung des Stapels nicht übermäßig behindert. Zum anderen soll sich die Leitfähigkeit bei jeglichen Dehnungen möglichst wenig verändern, die Elektrode darf also eine gewisse Mindestdicke nicht unterschreiten.

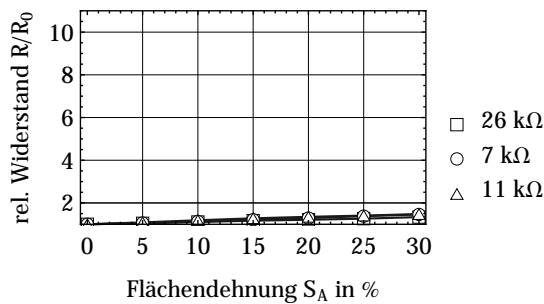
Eine Hysterese der Dehnungsabhängigkeit ist bei allen Elektrodenmaterialien in unterschiedlicher Ausprägung zu finden. In Abbildung 3.49 ist zu erkennen, dass der Widerstand der Elektrode während der Entspannung niedriger als auf dem ansteigenden Ast ist: Die Hysterese ist daher auch auf die viskoelastischen Eigenschaften des Trägermaterials zurückzuführen. Während der Messung entspannt sich das Material und senkt damit die Dehnung der Elektrode. Im entspannten



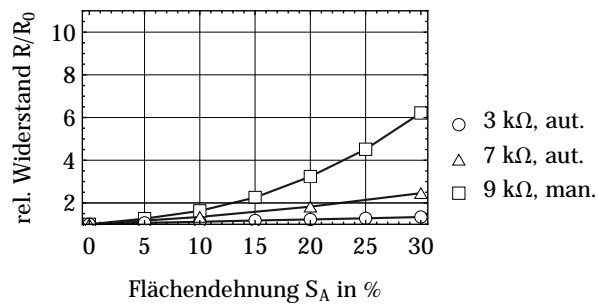
(a) NGS MF2



(b) Vulcan XC72



(c) MER MWCNT



(d) Baytubes

Abbildung 3.48: Einfluss der Flächendehnung auf den Elektrodenwiderstand.

Zustand stellt sich die Elektrode wieder als eine homogen leitfähige Fläche mit dem ursprünglichen Ausgangswiderstand dar.

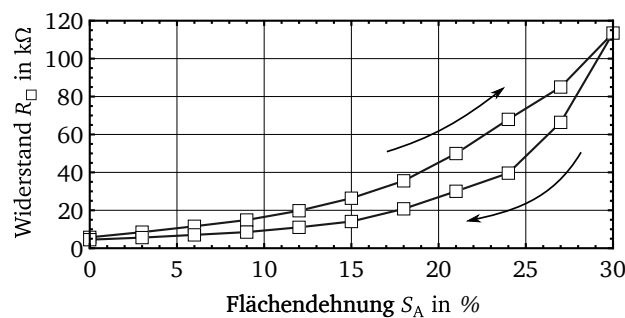


Abbildung 3.49: Typischer Verlauf des elektrischen Widerstandes einer Graphitschicht.

Es können daher drei wesentliche Merkmale für die Leitfähigkeit einer dehnbaren Elektrode definiert werden:

- Grundwiderstand
- Hysterese
- Nichtlinearität

Diese Merkmale können während der Herstellung durch die Herstellungsparameter Sprühdauer $t_{\text{sprüh}}$ und Anzahl der Sprühschichten n beeinflusst werden. Das Produkt aus Sprühdauer $t_{\text{sprüh}}$ und der Anzahl der gesprühten Schichten n stellt hierbei ein Maß für die Gesamtmenge G an Graphit dar, aus der die Elektrode besteht.

Für die Ermittlung geeigneter Prozessparameter ist es hilfreich, die drei oben genannten Merkmale in einem Zahlenwert quantifizieren zu können, um die Ergebnisse verschiedener Prozessparametersätze einfach miteinander vergleichen zu können.

Die erste Größe, der Grundwiderstand, kann einfach durch eine Messung an der ungedehnten Elektrode ermittelt werden. Für die Quantifizierung der Nichtlinearität wird zunächst mit der Methode der kleinsten Quadrate eine lineare Funktion ermittelt, deren Abweichung zu den Messwerten minimal ist. Die Summe der verbleibenden quadrierten Abweichungen wird dann als Maß für die Nichtlinearität verwendet. Ebenso wird für die Quantifizierung der Hysterese verfahren, siehe Anhang B.3. Einziger Unterschied ist, dass hierfür keine lineare Funktion sondern eine quadratische Gleichung an die Messwerte angepasst wird.

Abbildung 3.50 zeigt die Ergebnisse einer Prozessparameterstudie. Erwartungsgemäß bestimmt die Gesamtmenge G den Grundwiderstand maßgeblich, siehe Diagramm 3.50(a). Im Gegensatz dazu hat die Gesamtpartikelmenge keinen eindeutigen Einfluss auf die Größe der Hysterese, wie Diagramm 3.50(b) zu entnehmen ist. Erst wenn die Daten aus dieser Abbildung nach Sprühdauer und Anzahl der Schichten getrennt dargestellt werden, wird der zugrundeliegende Einfluss sichtbar und ist in Diagramm 3.50(c) dargestellt. Offensichtlich hat das mehrmalige Sprühen der Schichten einen positiven Einfluss auf die Hysterese des Elektrodenwiderstandes. Durch die zunehmende Dehnung reißt die leitfähige Schicht mikroskopisch auf und es bilden sich leitfähige Schollen, die nur über wenige Kontaktstellen mit einander verbunden sind. Durch die Aufeinandererschichtung bei mehreren Sprühvorgängen wird die Tendenz zur Schollenbildung offensichtlich verringert und zeigt sich in Abbildung 3.50(c) in einer geringeren Hysteresegröße für zwei und drei Sprühvorgänge.

Aufgrund dieser Ergebnisse werden alle Graphitelektroden mit mindestens zwei Sprühvorgängen hergestellt. Als Kompromiss zwischen Dicke und Widerstand der Elektroden wird die Sprühdauer so eingestellt, dass die Elektroden einen Flächenwiderstand von $10 \text{ k}\Omega_{\square}$ aufweisen.

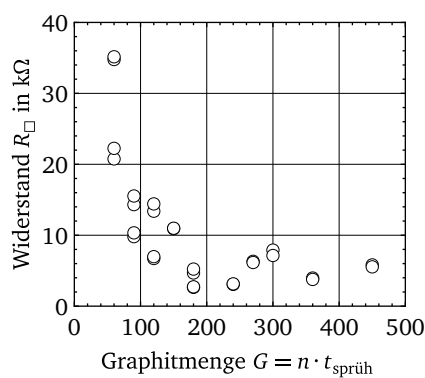
3.4 Verbesserung der Herstellungstechnologie

Die durchgeführten Untersuchungen am Dielektrikum der Aktoren zeigen das Potenzial anorganischer Füllstoffe, aber auch die hierdurch entstehenden Probleme. Das Einbringen der Füllstoffe in die Polymermatrix beeinflusst die drei wichtigen Materialeigenschaften Permittivität, Elastizitätsmodul und Durchbruchfestigkeit in unterschiedlicher Weise. Alle getesteten Materialien senken die Durchbruchfestigkeit deutlich. Lediglich Bariumtitanat kann aufgrund seiner hohen Permittivität und der erzeugten Erweichung des Polymers diese Verschlechterung teilweise kompensieren.

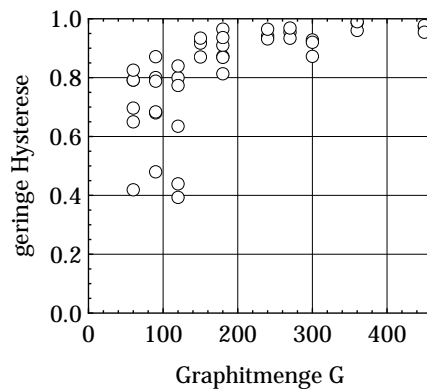
Aufgrund der schnellen Vernetzung des Elastosil[®] P7670 steht praktisch kein alternatives Silikon für die Herstellung gestapelter Elastomeraktoren zur Verfügung. Daher stellt Bariumtitanat eine vielversprechende Möglichkeit dar, die Auslenkung der Aktoren zu erhöhen.

Für die Elektroden der Aktoren zeigen die Abschätzungen, dass für Betriebsfrequenzen bis zu 1 kHz der Flächenwiderstand höchstens $10 \text{ k}\Omega_{\square}$ betragen sollte. Sowohl mit Graphit als auch CNT-Materialien kann dieser Wert leicht erreicht werden. Während das Graphit NGS MF2 die beste Verarbeitbarkeit aufweist, zeigen Elektroden aus CNT-Materialien eine wesentlich geringere Widerstandsänderung unter Dehnung auf.

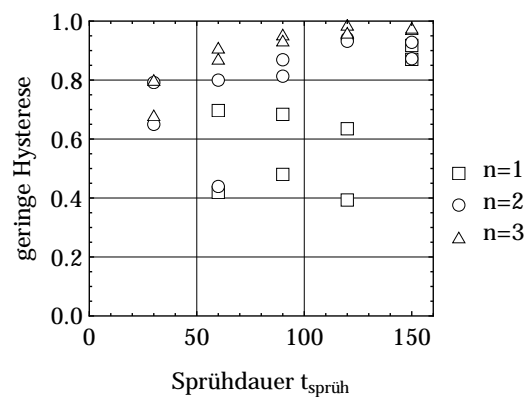
Um Aktoren mit einer reproduzierbaren Qualität herstellen zu können, wurde eine automatisierte Fertigungsanlage entwickelt und aufgebaut. Die Modulbauweise erlaubt ein einfaches Hinzufügen neuer Prozessschritte, um alternative Materialien zu evaluieren und zu verarbeiten.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 3.50: Ermittlung der Sprühparameter. (a) Abhängigkeit des Grundwiderstandes von der Graphitmenge; (b) Einfluss der Graphitmenge auf die Hysterese; (c) Einfluss von Geschwindigkeit und Sprühzahl auf die Hysterese.

Von den verschiedenen Prozessschritten wurde im Rahmen dieser Arbeit insbesondere das Aufsprühen der Elektroden intensiv untersucht. Durch das Aufsprühen des leitfähigen Pulvers aus einer Suspension wird eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Elektrodenleitfähigkeit erreicht. Vorteilhaft ist ein mehrmaliges Aufsprühen, da dies die Hysterese der Dehnungsabhängigkeit des Elektrodenwiderstandes senkt.

4 Messtechnik und Charakterisierung der Aktoreigenschaften

Zur Charakterisierung der verschiedenen Aktoreigenschaften ist es notwendig, parallel zur Weiterentwicklung der Elastomeraktoren, die im Rahmen dieser Arbeit stattgefunden hat, einen Messplatz für dielektrische Elastomeraktoren aufzubauen. Abbildung 4.1 zeigt die Struktur dieses Universalmessplatzes. Die vier Hauptmessaufgaben sind farblich hervorgehoben.

- Ein Kraftmesssystem erlaubt die Aufnahme von Spannungs-Dehnungskennlinien an Elastomermaterialien und Stapelaktoren sowie die Messung der Rückstellkraft dielektrischer Elastomeraktoren.
- Die Messung von Schichtwiderständen erlaubt die Qualifizierung von Elektrodenmaterialien auch unter dem Einfluss einer lateralen Dehnung der Probe.
- Mit Hilfe der Impedanzmessung wird die Qualität der Kontaktierung überprüft. Im Vergleich mit der nominellen Kapazität der Stapelaktoren ist eine Aussage über die Anzahl der kontaktierten Schichten möglich.
- Die Auslenkungsmessung erlaubt durch eine beidseitige, berührungslose Messung der Aktoren die Messung der tatsächlichen Aktorverformung im aktuierten Zustand.

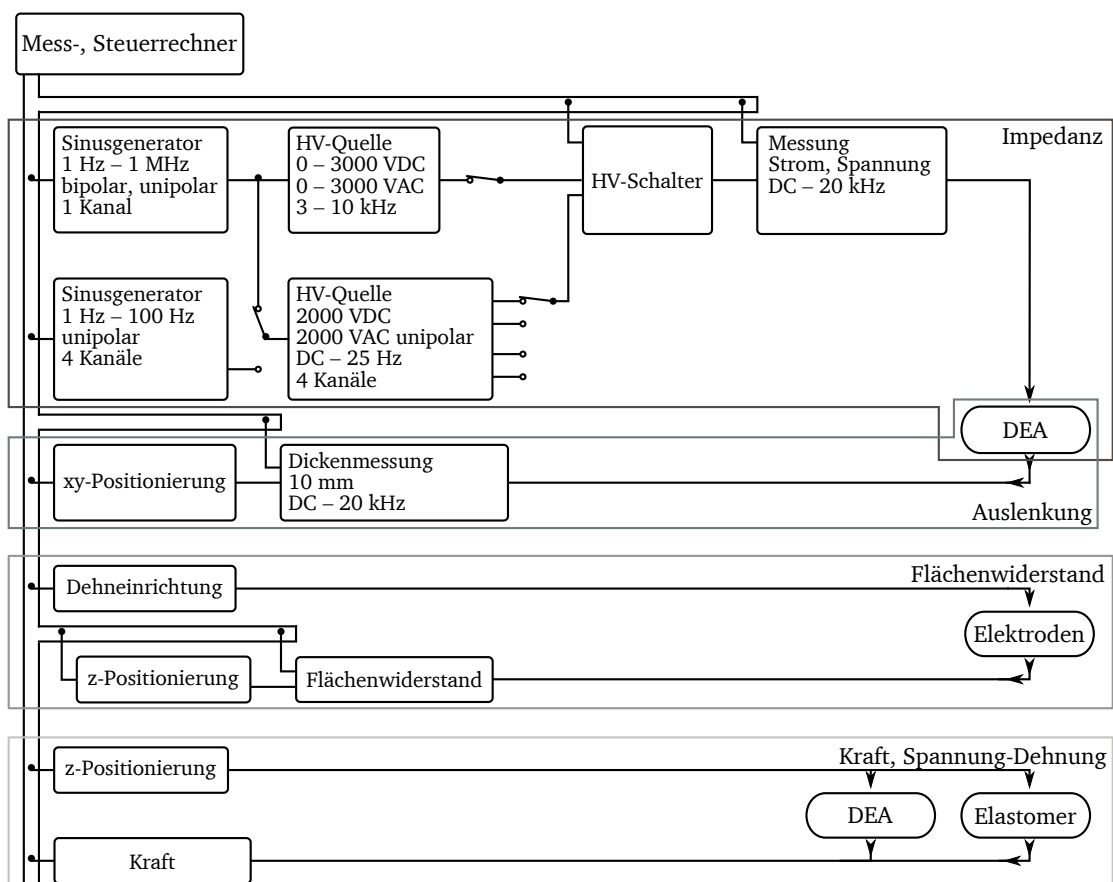


Abbildung 4.1: Struktur des Messplatzes für dielektrische Elastomeraktoren.

Zentrales Element für die Messwerterfassung ist ein Rechner mit entsprechender Schnittstellenausstattung. Die hochdynamischen Signale der Impedanz- und Auslenkungsmessung werden über eine Messkarte (Addi-Data® APCI 3016) mit einer Datenrate von 50 kHz pro Kanal aufgenommen. Die langsameren Signale der Widerstandsmessung sowie von Kraft- und Spannungs-Dehnungsverläufen werden mit einer weiteren Messkarte (Addi-Data® APCI-3120) erfasst. Für die Kommunikation mit der xyz-Präzisionspositionierung steht eine GBIP-Schnittstelle zur Verfügung. Mit den verbleibenden Komponenten kommuniziert der Rechner über RS232-Schnittstellen und USB.

Obwohl der Messplatz fast vollständig auf Standardkomponenten basiert, ist die Vermessung von dielektrischen Elastomerstapelaktoren keine Standardaufgabe. In den folgenden Abschnitten wird detailliert auf die speziellen Anforderungen eingegangen, die das Messobjekt Elastomerstapelaktor bedingt.

4.1 Kraft und Elastizität

Der in Abbildung 4.2 dargestellte Messplatz ist für die Ermittlung von Kraft-Weg- bzw. Spannungs-Dehnungs-Kurven an Materialproben und Aktoren ausgelegt. Messköpfe verschiedener Größe erlauben die Durchführung unterschiedlicher Messszenarien. Die Kennwerte des Messplatzes sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

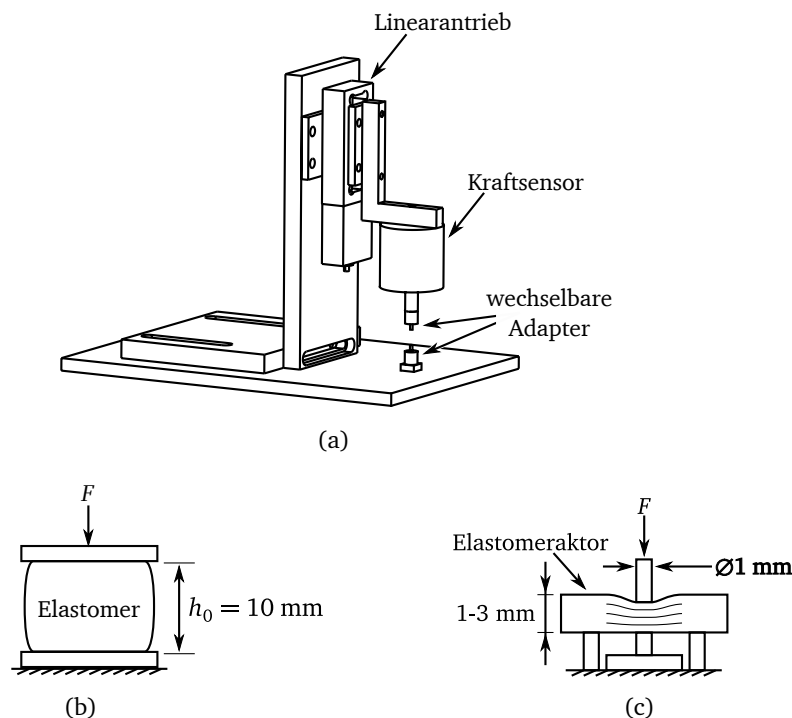


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Messplatzes zur Bestimmung des kompressiven Elastizitätsmoduls. (a) Gesamtansicht; (b) Adapter und Krafteinleitung bei Elastomerproben; (c) Adapter und Krafteinleitung bei Stapelaktoren.

Das uniaxiale Kompressionsmodul Y_c von reinen Elastomerproben wird an Prüfkörpern mit einem Durchmesser und einer Höhe von 10 mm ermittelt, siehe Abbildung 4.2(b). Die Krafteinleitung erfolgt gleichmäßig über die gesamte Stirnfläche der Aktoren. Die Probenhöhe und eine Schmierung zwischen Probe und Krafteinleitung vermindert den Einfluss der Einspannung zusätzlich und trägt Sorge, dass ein uniaxialer Spannungszustand vorliegt.

Um das Verhältnis von Probenhöhe zu Durchmesser bei der Messung an Stapelaktoren beizubehalten, wird die Kraft über eine kleinere Fläche in die Aktoren eingeleitet. Kleinere Adapterdurchmesser bis zu 1 mm erlauben es, auch Aktoren zu vermessen und dabei das Durchmesser-Probendicken-Verhältnis von 1 : 1 beizubehalten. Wie bei den Silikonprobekörpern wird auch bei diesen Messungen die Probe nur zwischen den Adaptern zur Krafteinleitung eingespannt, seitlich können sich die Proben frei bewegen. Damit die dünnen Aktoren nicht vom Adapter herabhängen, werden sie seitlich unterstützt, siehe Abbildung 4.2(c). Die kleinen Adapter können auch dazu genutzt werden, die Rückstellkräfte aktivierter Aktoren punktuell zu vermessen.

Tabelle 4.1: Kennwerte des Kraft- und Elastizitätsmessplatzes

	Messbereich	Auflösung
Kraft	50 N	0,1 mN
Weg	25 mm	0,5 μm

4.2 Flächenwiderstand

Mit dem in Abbildung 4.3(a) dargestellten Widerstandsmessplatz können Schichtwiderstände elastischer Elektrodenmaterialien vermessen werden. Die leitfähigen Materialien müssen als rechteckige Fläche auf einem elastischen Material aufgetragen sein. Der 4-Punkt-Messkopf eines Messgerätes zur Bestimmung des Schichtwiderstandes (SD510, NAGY Messsysteme) wird automatisiert auf die Messprobe aufgesetzt. Hierbei wird die Kraft über einen Kraftsensor geregelt, der die Probe von unten unterstützt. Nach der Messwertaufnahme werden Kraftsensor und Messkopf von der Probe abgehoben und die Probe kann mit Hilfe der in Abbildung 4.3(b) dargestellten Einspannung definiert gedehnt werden. Die Kennwerte des Messplatzes sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

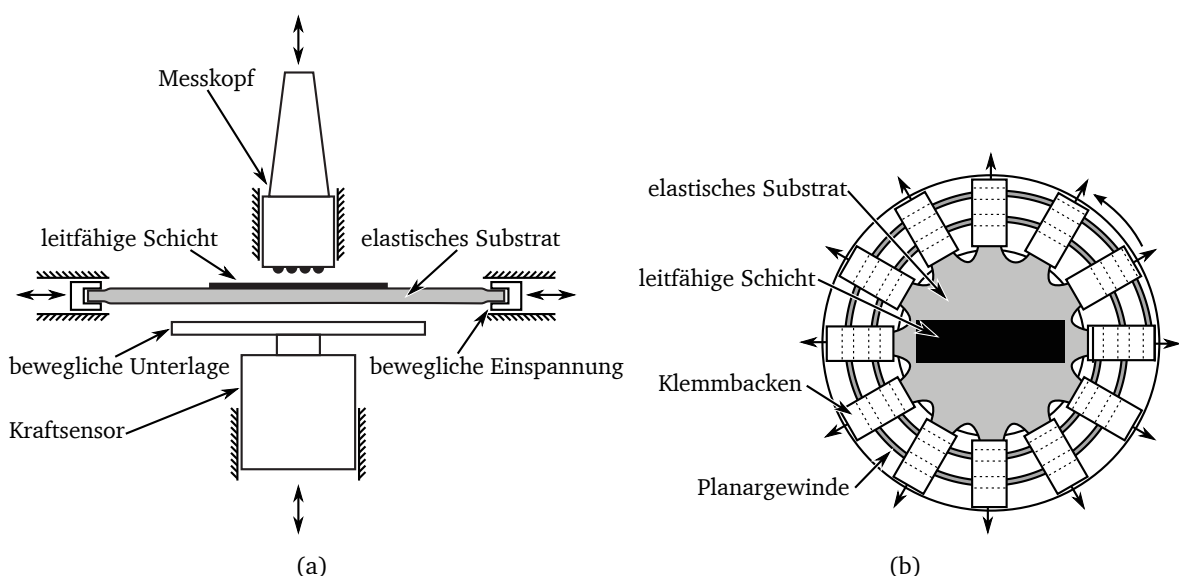


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des Messplatzes zur Ermittlung von Schichtwiderständen. (a) Seitliche Ansicht mit Messkopf und Kraftsensor. (b) Draufsicht auf Spanneinrichtung zur Probendehnung.

Tabelle 4.2: Kennwerte des Widerstandsmessplatzes

	Messbereich	Auflösung
Schichtwiderstand	200 k Ω_{\square}	0,1 % FS
Flächendehnung A/A_0	500 % A_0	0,5 % A_0

4.3 Impedanzmessung

Übliche Impedanzmessgeräte arbeiten mit niedrigen Spannungsamplituden bis zu 2 V. In Verbindung mit den verhältnismäßig hohen Widerständen der Graphitelektroden bedeutet dies ein ungünstiges Signal-Rausch-Verhältnis, da die zu messenden Ströme sehr klein bleiben. Wesentlich bessere Messergebnisse sind zu erhalten, wenn die Impedanzmessungen mit Spannungsamplituden durchgeführt werden, die näher am Bereich der Betriebsspannung dielektrischer Elastomeraktoren liegen.

Abbildung 4.4 zeigt den prinzipiellen Frequenzgang des Impedanzbetrages eines dielektrischen Elastomeraktors. Mit Hilfe einer solchen Messkurve können die Parameter des Ersatzschaltbildes, Abbildung 4.4(a) bestimmt werden.

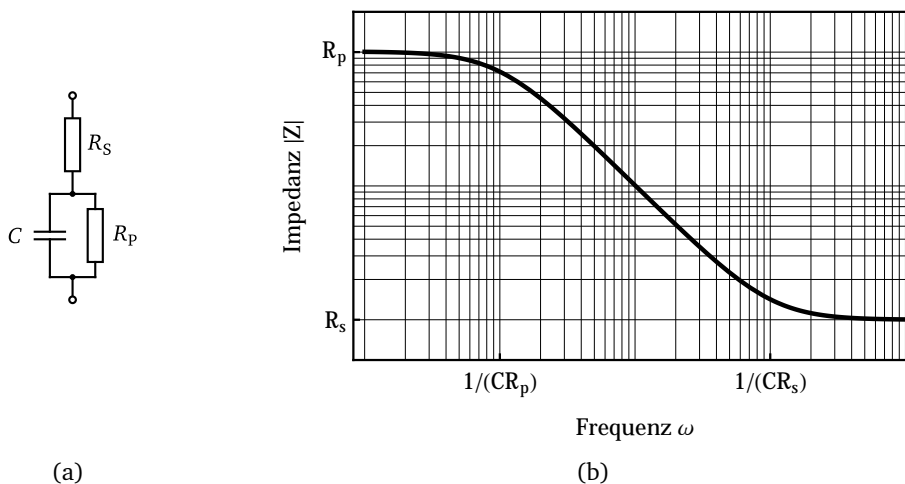


Abbildung 4.4: Impedanz eines dielektrischen Elastomeraktors. (a) Ersatzschaltbild; (b) Frequenzgang mit charakteristischen Werten.

Für einen typischen Elastomerstapelaktor mit einer Fläche von ca. 30 mm² und 50 Schichten kann eine Impedanz $C \approx 1$ nF angenommen werden. Mit der minimalen bipolaren Frequenz des Messplatzes $f_{bi, \min} = 2$ Hz kann daher noch ein Parallelwiderstand $R_p < 8$ M Ω aufgelöst werden. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass der Parallelwiderstand des dielektrischen Films mindestens $R_{p, p7670} > 100$ G Ω beträgt [Fli07; JMS04].

Das gleiche gilt analog für den Serienwiderstand R_s . Aufgrund der maximalen Frequenz $f_{bi, \max} = 10$ kHz kann noch ein Serienwiderstand $R_s > 150$ k Ω aufgelöst werden. Die Auslenkungsfrequenzgänge der Aktoren sprechen dagegen für einen kleineren Serienwiderstand als 150 k Ω .

Für die labortechnische Charakterisierung von Aktoren kommen daher drei Ersatzmodelle in Frage, die in Abbildung 4.5 dargestellt sind. Das erste Modell entspricht dem allgemeinen Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.4. Aufgrund der oben genannten Gründe, kann der Frequenzgang dieser

Impedanz innerhalb des Spektrums des Messplatzes nur bei speziellen Elastomeraktoren beobachtet werden. Ebenso hat das zweite Modell praktisch nur labortechnische Bedeutung. Ein Aktor, dessen Parallelwiderstand R_p deutlich kleiner als der Zuleitungswiderstand ist, wird keine signifikante Auslenkung zeigen. Dieses Modell kann aber hilfreich für die Untersuchung von Problemen im Herstellungsprozess sein. Das Modell mit der größten praktischen Bedeutung ist das dritte in Abbildung 4.5. Dieses Modell entspricht einem idealen Elastomeraktor mit einer verlustlosen Kapazität C und einem Zuleitungswiderstand R_s .

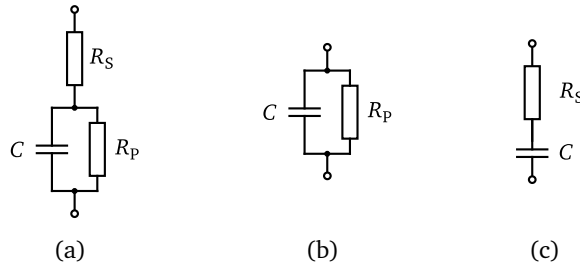


Abbildung 4.5: Ersatzmodelle des Impedanzmessplatzes.

Aus den Spannungs- und Strommesswerten von Aktorelementen können die Parameter R_s , R_p und C für die gezeigten Ersatzmodelle extrahiert werden. Mit Hilfe von Gleichung (3.20) können dann die Anzahl n der kontaktierten Schichten sowie der effektive Widerstand R_{Schicht} einer Elektroden-schicht bestimmt werden, siehe Abschnitt 5.1.1.

4.4 Auslenkungsmessung

Dielektrische Elastomeraktoren sind flexible Festkörperaktoren mit einer geringen Eigensteifigkeit. Durch die Volumeninvarianz sind Längsdehnung und Querdehnung des Polymermaterials nach Gleichung (2.12) miteinander verknüpft. Dies erlaubt zwei grundsätzliche Verfahren der Auslenkungsmessung:

- Direktes Messen der Auslenkung in Richtung des angelegten elektrischen Feldes.
- Indirekte Messung der planaren Ausdehnung bzw. Flächendehnung, orthogonal zur Richtung des angelegten elektrischen Feldes.

Das Messen der planaren Ausdehnung bietet den Vorteil, dass sie mit einfachen Mitteln in Form von Consumer-Kameras oder Webcams erfasst werden kann. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn es sich um einlagige vorgespannte Elastomeraktoren handelt, deren statische oder quasistatische Ausdehnung von mehreren hundert Prozent beobachtet werden soll.

Auf den hier betrachteten Fall von Elastomerstapelaktoren kann dies nicht direkt übertragen werden, weil die Verhältnisse der vorgespannten Aktoren nicht gegeben sind. In Abbildung 4.6 ist ein deformierter Stapelaktor schematisch dargestellt. Die Materialstauchung durch die Aktoren verursacht eine laterale Dehnung, wodurch sich der Aktor nach unten wölbt.

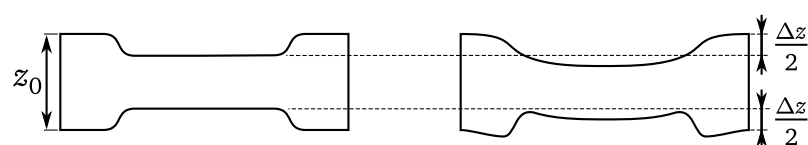


Abbildung 4.6: Verwölbung eines Stapelaktors aufgrund der lateralen Dehnung

Ein weiterer Unterschied ist der zu untersuchende Frequenzbereich. Vorgespannte Aktoren aus Polyacryl können aufgrund der ausgeprägten viskoelastischen Eigenschaften nur bis zu einigen Hertz betrieben werden. Bei den hier vorliegenden Elastomerstapelaktoren interessiert aber die Auslenkung bei Frequenzen bis zu 1 kHz.

Die Aufnahme der lateralen Dehnung gibt zudem nur eine integrale Information über die Dehnung im aktiven Bereich des Aktors. Unterschiede in der Auslenkung aufgrund von Inhomogenitäten in der Elektrode oder im Dielektrikum können so nicht detektiert werden.

Aus diesen Gründen wird für die Detektion ein System aus Lasertriangulatoren (Keyence LK-G32) verwendet, das dynamische Messungen bis 10 kHz mit einer Auflösung besser als $1\text{ }\mu\text{m}$ erlaubt. Die Triangulatoren sind fest zueinander justiert und können mit Hilfe einer xy-Positionierung die Aktorfläche in einem Bereich von $25 \cdot 25\text{ mm}^2$ abtasten, siehe Abbildung 4.7. Die Kennwerte des Messplatzes sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

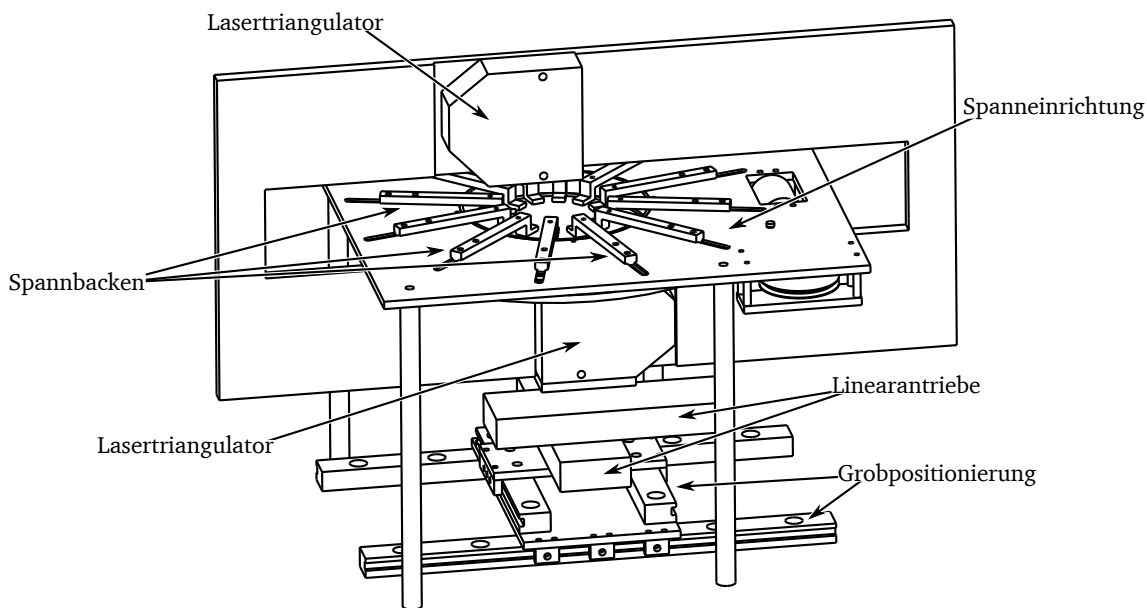
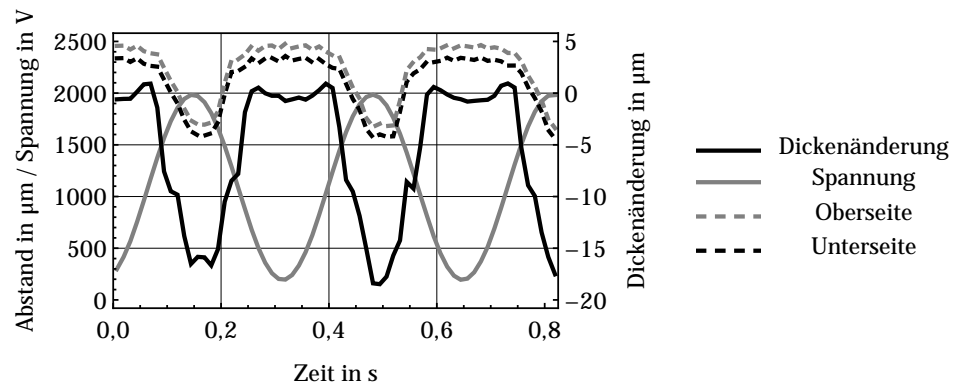


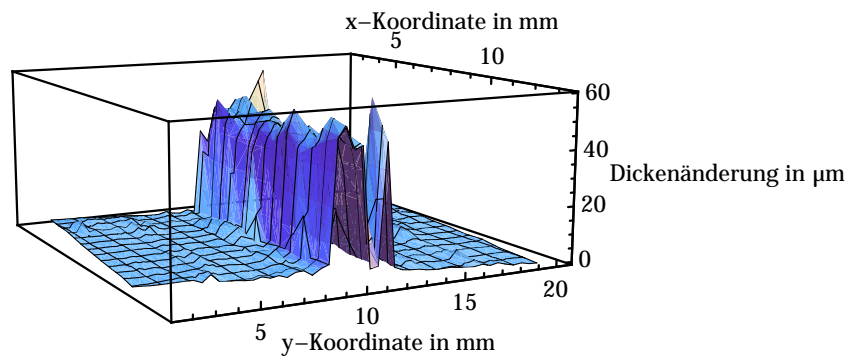
Abbildung 4.7: Doppeltriangulatorsystem zur Messung der Dickenänderung dielektrischer Elastomerstapelaktoren.

Abbildung 4.8(a) stellt die wesentlichen Messgrößen einer Auslenkungsmessung an einem einschichtigen Aktor mit einer Dicke von $80\text{ }\mu\text{m}$ dar. Die graue sinusförmige Kurve zeigt die Ansteuerung, die an den Aktoren anliegt. Die beiden gestrichelten Kurven zeigen die Signale der beiden Triangulatoren. Die Amplituden von ca. $700\text{ }\mu\text{m}$ bestätigen die Notwendigkeit einer Dickenmessung, da sie das Durchsacken des Aktors anzeigen. Erst durch Differenzbildung dieser beiden Signale erhält man die momentane Dicke des Aktors. Die durchgehende schwarze Kurve stellt die eigentliche Auslenkung von $18\text{ }\mu\text{m}$ des Aktors dar. Bezogen auf die Filmdicke bedeutet dies eine Dickenänderung von 22,5 %.

Abbildung 4.8(b) zeigt als weiteres Beispiel der Messmöglichkeiten die Amplitude Dickenänderung eines Stapelaktors mit 30 Schichten während eines Flächenscans. Der Aktor besitzt mehrere parallele Aktorelemente mit einer Größe von $3\text{ mm}^2 \times 10\text{ mm}^2$. Eines dieser Elemente wird während der Messung mit 10 Hz betrieben. In den Messergebnissen ist der scharfe Übergang von passivem, ruhendem Material zum aktiven Aktorbereich gut zu erkennen.



(a) Messgrößen des Auslenkungs- und Dickenmessplatz.



(b) Ergebnis eines Flächenscans.

Abbildung 4.8: Ergebnis der Auslenkungsmessung. (a) Messsignale der Auslenkungsmessung (b) Dickenänderung während eines xy-Scans an einem Elastomeraktor mit einem aktuierten Aktorelement ($3 \times 10 \text{ mm}^2$, 10 Hz, 1,4 kV) als 3D-Diagramm.

Tabelle 4.3: Kennwerte des Auslenkungsmessplatzes

	Messbereich	Auflösung
Spannung	$\pm 10 \text{ kV}$	150 mV
Strom	10 mA	150 nA
Dicke	$\pm 5 \text{ mm}$	0,5 μm
x,y-Koordinate	20 mm	0,5 μm
Frequenz	25 kHz	20 μm



5 Charakterisierung und Modellierung

In diesem Kapitel werden die elektrischen und elektromechanischen Eigenschaften der dielektrischen Elastomerstapelaktoren untersucht. Ein Vergleich der Messwerte mit Modellen des elektrischen und elektromechanischen Systems der Aktoren zeigt die Qualität der Aktoren und des Herstellungsprozesses. Zunächst werden die elektrischen Eigenschaften Kontaktierung der Elektroden und Elektrodenwiderstand überprüft, anschließend die Aktorauslenkung.

5.1 Elektrisches Verhalten

Die beiden relevanten elektrischen Eigenschaften des dielektrischen Elastomeraktors sind die Kapazität und der Widerstand. Die Kapazität ist proportional zur Anzahl der kontaktierten Schichten im Stapel und ist daher ein Maß dafür, wie hoch der Anteil an aktivem Material im gesamten Aktor ist. Der Widerstand bestimmt dagegen vor allem das dynamische Verhalten der Aktoren.

5.1.1 Kontaktierung

Ausgehend von der Beschreibung des Messplatzes zur Bestimmung der Aktorkapazität und zur Überprüfung der Schichtkontaktierung in Abschnitt 4.3 zeigt Abbildung 5.1 das Histogramm des Anteils kontaktierter Schichten von 115 Stapelaktorelementen. Die Schichtdicken variieren in dieser Stichprobe von 30 μm bis 60 μm , die Anzahl der Schichten zwischen 30 und 80. Es ist deutlich zu erkennen, dass in mehr als 77 % der Aktorelemente mindestens 60 % der Schichten kontaktiert sind.

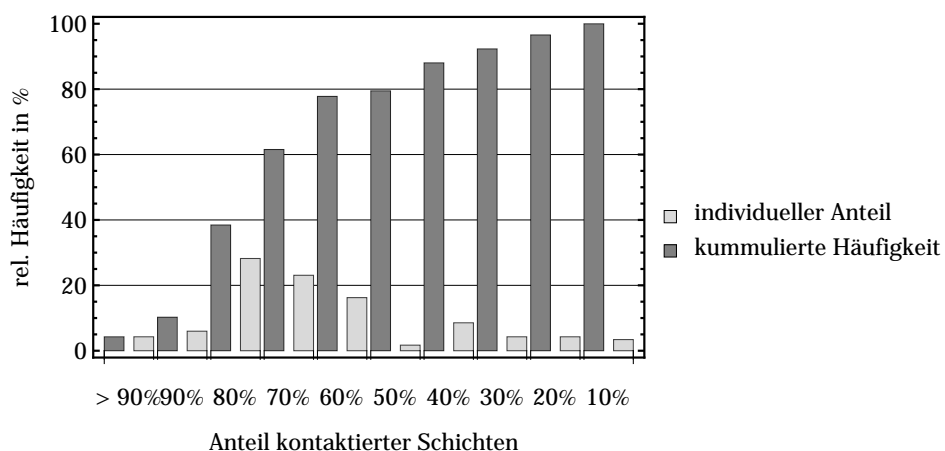


Abbildung 5.1: Histogramm des Anteils kontaktierter Schichten. Zugrunde liegen 115 Aktorelemente unterschiedlicher Größe und Schichtanzahl.

5.1.2 Schichtwiderstand

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Beschränkung der Messfrequenz verhindert eine direkte Messung des Serienwiderstandes R_s . Mit Hilfe eines zusätzlichen Widerstandes R_z kann jedoch der Serienwiderstand vergrößert werden und die Frequenz $\omega = 1/(R_s + R_z)C$ in den Messbereich des Messplatzes verschoben werden. Der Schichtwiderstand R_s ergibt sich dann aus der Differenz zwischen gemessenem Widerstand und dem zusätzlichen Hilfs-widerstand R_z . Je nach Kapazität und Widerstand des zu untersuchenden Aktors muss der Widerstand R_z angepasst werden. Für die unten dargestellten Aktoren wurden Widerstände zwischen 269 k Ω und 326 k Ω verwendet.

Abbildung 5.2 zeigt die auf diese Weise ermittelten Serienwiderstände $R_{s, \text{Schicht}}$ verschiedener Stapelaktoren. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, sind die Werte bereits anhand der jeweiligen Anzahl kontaktierter Schichten auf je eine Einzelschicht bezogen. Aus dem jeweiligen Breiten-Längen-Verhältnis der Elektrodengeometrie wurden zusätzlich die zugehörigen Schichtwiderstände R_{\square} der Graphitelektroden errechnet.

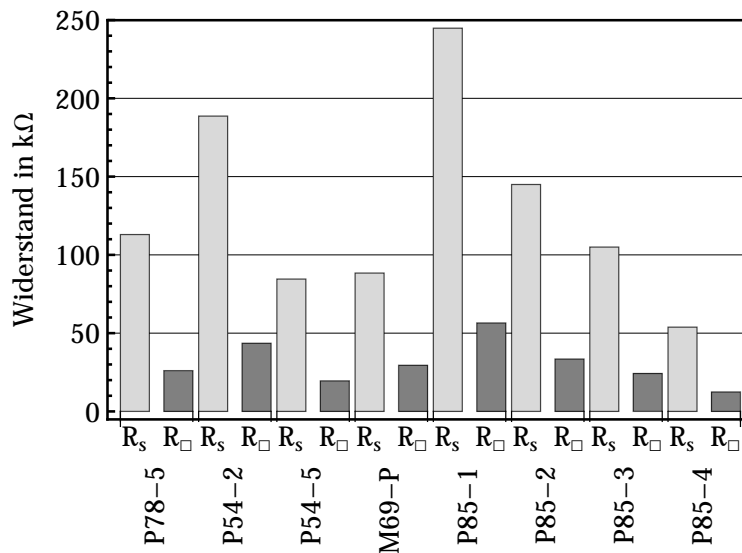


Abbildung 5.2: Gemessene Serienwiderstände je Schicht $R_{s, \text{Schicht}}$ und Schichtwiderstände R_{\square} von Elastomerstapelaktoren. Die Größe R_s bezieht sich auf das Ersatzschaltbild in Abbildung 3.20.

Der Mittelwert der Schichtwiderstände beträgt $R_{\square} \approx 30 \text{ k}\Omega_{\square}$. Dieser Wert liegt damit höher als der in Abschnitt 3.2 geforderte Wert von $10 \text{ k}\Omega_{\square}$. Es ist aber anzunehmen, dass der Übergangswiderstand von Zuleitung zu Graphitelektrode einen großen Anteil an dem hier ermittelten Wert hat und die Elektroden trotz des hohen Wertes die geforderte Qualität erbringen.

5.2 Elektromechanisches Verhalten

Die Ergebnisse des letzten Abschnitts haben gezeigt, dass bei Stapelaktoren nicht von einer vollständigen Kontaktierung der Elektroden-schichten ausgegangen werden kann. In der nun zunächst folgenden Beschreibung des quasistatischen Verhaltens dielektrischer Elastomerstapelaktoren wird dieser Umstand berücksichtigt und es wird gezeigt, wie die statische Auslenkung dennoch be-

rechnet werden kann. Diese Ergebnisse werden dann auch für die Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Aktoren genutzt.

5.2.1 Statische Auslenkung

Die statische Auslenkung sowie die Ruhestromaufnahme der Aktoren wird mit Hilfe der Gleichspannungsquellen und des Hochspannungsschalters aus Abbildung 4.1 ermittelt. Abbildung 5.3 zeigt die Dickenänderungen eines Aktors als Antwort auf Spannungssprünge verschiedener Amplituden. Die nichtlineare Abhängigkeit der Auslenkung der Aktoren von der anliegenden Spannung ist deutlich zu erkennen. Obwohl das verwendete Silikon-Elastomer als ein nur wenig dämpfendes Material gilt, benötigt der Aktor einige Minuten bis die Auslenkung einen statischen Endwert erreicht.

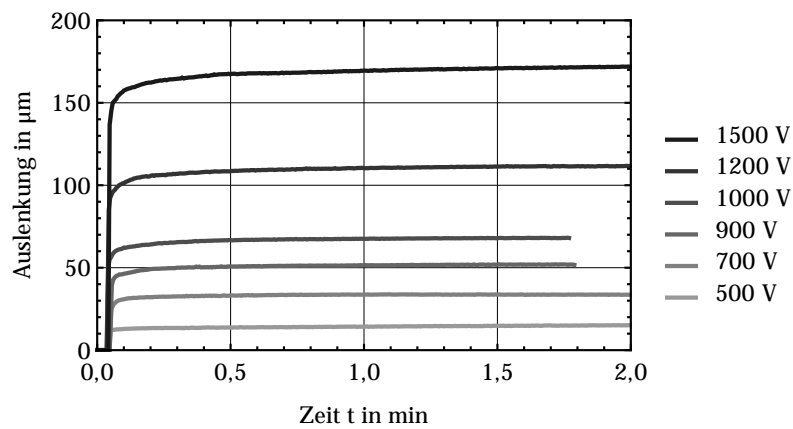


Abbildung 5.3: Sprungantworten eines 30-schichtigen Elastomerstapelaktors bei verschiedenen Spannungen.

In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, dass mit Gleichung (2.19) die Auslenkung von Elastomeraktoren näherungsweise bestimmt werden kann:

$$\Delta z = n \cdot z_0 \cdot \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{Y_c} \cdot \frac{U^2}{z_0^2} \quad (5.1)$$

Vergleicht man die Auslenkungen verschiedener Elastomerstapelaktoren aus n Einzelschichten mit den Werten der Gleichung (5.1) in Abbildung 5.4, so ist eine deutliche Abweichung zwischen den vorhergesagten statischen Auslenkungen sowie tatsächlich messbaren Auslenkungen zu erkennen. Gleichung (5.1) überschätzt die reale Auslenkung deutlich.

Dies ist nicht überraschend, beschreibt Gleichung (5.1) doch die Auslenkung eines idealen Elastomeraktors. Die Gleichung beinhaltet vier Größen, die für die Abweichung der realen Werte verantwortlich sein können:

- Der kompressive Elastizitätsmodul Y_c
- Die Anzahl kontaktierter Schichten n_{aktiv}
- Die Gesamtdicke des Aktors $n \cdot z_0$

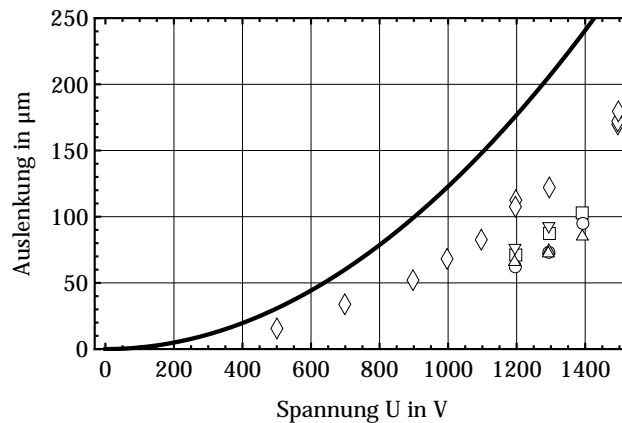


Abbildung 5.4: Statische Auslenkungen verschiedener Elastomerstapelaktoren bei unterschiedlichen Spannungen.

Elastizitätsmodul gestapelter Elastomerschichten

Bei der Wahl der Elektrode wurde Wert auf eine möglichst gute Dehnbarkeit gelegt, um die Kompression des aktuierten dielektrischen Films möglichst wenig zu behindern. In der bisherigen Ermittlung des kompressiven Elastizitätsmoduls des Dielektrikums wurde der seitlich freien Bewegung der Aktoren durch die Verwendung hoher Prüfkörper Rechnung getragen, auf die die mechanische Einspannung nur geringen Einfluss hat, siehe Abschnitt 4.1.

Die Untersuchung der Spannungsdehnungskurve von Elastomeraktoren verschiedener Geometrien offenbart, dass die Moduln von reinem Dielektrikum und geschichtetem Aktor nicht vergleichbar sind. Wie aus Abbildung 5.5 ersichtlich ist, wird im Bereich der Aktorelemente ein bis zu doppelt so hohes Modul wie am reinen Silikon-Prüfkörper gemessen.

Wie schon in Abschnitt 4.1 beschrieben, unterscheiden sich die Abmessungen von Silikonprüfkörper und Stapelaktor. Während die Prüfkörper eine Höhe und einen Durchmesser von 10 mm besitzen, weisen die Aktoren dagegen eine maximale Höhe von 3 mm auf. Da die Kraft in die Aktoren auf einer Querschnittsfläche von 1 mm^2 eingeleitet wird, sind die Aktoren im Verhältnis sogar länger als die Probekörper. Randeffekte sollten daher einen noch kleineren Einfluss haben.

Somit sprechen die Messergebnisse dafür, dass das kompressive Elastizitätsmodul der Aktoren höher ist als das des reinen Silikonmaterials. Dies kann durch die vielen Einzelschichten und das dazwischen eingelagerte Graphit begründet sein. Aber auch die Herstellung selbst kann die Härte des Materials beeinflussen. Der wachsende Stapel wird zur Vernetzung jeder Schicht auf über 100°C erhitzt. Hierdurch kann das Material insgesamt stärker vernetzen als dies im Silikonprobekörper möglich ist.

Anzahl kontaktierter Schichten und Gesamtdicke des Aktors

Die Messung der Impedanz verschiedener Elastomerstapelaktoren hat in Abbildung 5.1 gezeigt, dass nicht alle Schichten zur aktiven Deformationen des Aktors beitragen.

Abbildung 5.6 skizziert einen nichtideal kontaktierten Stapelaktor. Eine der innenliegenden Elektroden ist nicht kontaktiert, zwei Dielektrikumsschichten erfahren daher keine Stauchung durch die umgebenden Elektroden. Dennoch haben diese passiven Schichten einen Einfluss auf das Aktorverhalten.

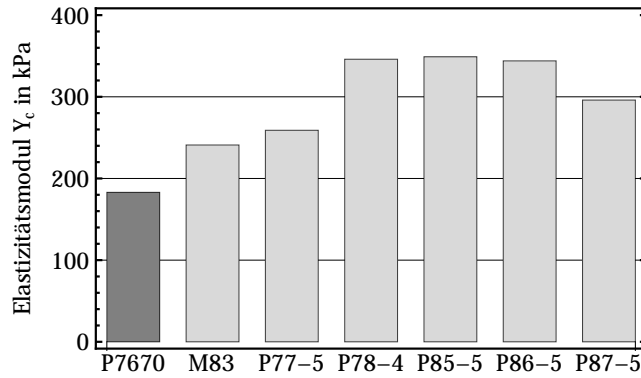


Abbildung 5.5: Vergleich der Elastizitätsmoduln des reinen Silikons und gestapelter Aktoren.

Der Maxwell-Druck staucht das Material der aktiven Schichten um einen Betrag S_z . Die Inkompressibilität des Elastomers bedingt eine gleichzeitige laterale Dehnung S_x der aktiven Schichten. Aufgrund der starken Adhäsion benachbarter Schichten wird eine anliegende passive Schicht um den gleichen Betrag wie die aktive Schicht lateral gedehnt. Da die passive Schicht selbst keine direkte Stauchung durch das elektrische Feld erfährt, übt sie dabei jedoch eine Druckspannung auf die aktiven Schichten aus.

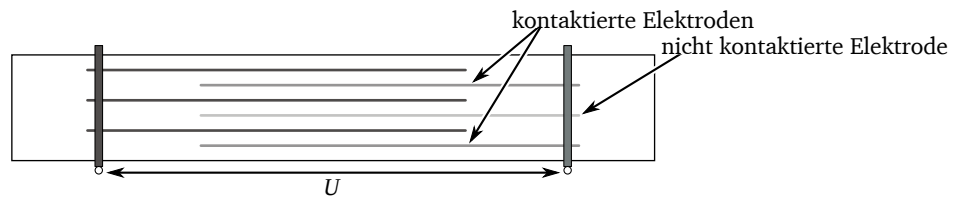


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung eines Elastomerstapelaktors mit nicht idealer Kontaktierung der Schichten.

Ausgehend vom Hook'schen Gesetz linearer Elastizität ist die Dehnung S_z mit den Spannungen T_{ij} über das Elastizitätsmodul Y und die Querkontraktionszahl $\nu \approx \frac{1}{2}$ in folgender Weise verknüpft:

$$S_z = -\frac{1}{Y}p + \frac{1}{2Y}T_{xx} + \frac{1}{2Y}T_{yy} \quad (5.2)$$

Analog zur Beziehung zwischen Längsdehnung S_z und Flächendehnung S_A , die in Abschnitt 2.2 hergeleitet wurde, stehen auch die Querdehnung S_x und Flächendehnung S_A aufgrund der Volumeninvarianz des Elastomermaterials in einer eindeutigen Beziehung zueinander:

$$\begin{aligned} A_0 \cdot z_0 &= (z_0 - \Delta z) (x_0 + \Delta x) (y_0 + \Delta y) \\ &= (z_0 - S_z z_0) (x_0 + S_x x_0) (y_0 + S_y y_0) \\ A_0 &= (1 - S_z) (1 + S_x) (1 + S_y) x_0 y_0 \\ 1 &= (1 - S_z) (1 + S_x) (1 + S_y) \end{aligned}$$

mit $S_x = S_y$

$$\begin{aligned} 1 &= (1 - S_z) (1 + S_x)^2 \\ \Rightarrow S_x &= \frac{1}{\sqrt{1 - S_z}} - 1 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die Spannung T_{xx} ist gerade die Rückwirkung der passiven Schicht auf die laterale Dehnung der aktiven Schicht. Sie ist daher proportional der lateralen Dehnung S_x

$$S_x = \frac{1}{Y} T_{xx} \quad (5.4)$$

und steht durch Gleichung (5.3) in folgender Beziehung mit der Dehnung S_z in elektrischer Feldrichtung:

$$\frac{1}{\sqrt{1+S_z}} - 1 = \frac{1}{Y} T_{xx} \quad (5.5)$$

Die unterschiedlichen Anteile der aktiven und passiven Schichten an der Gesamtdicke d_0 des Aktors werden durch die Verhältnisse d_a/d_0 (aktiv) bzw. d_p/d_0 (passiv) abgebildet:

$$\begin{aligned} S_z &= -\frac{d_a}{d_0} \frac{1}{Y_c} p + \frac{d_p}{d_0} \left(\frac{1}{Y_c} Y_c \left(\frac{1}{\sqrt{1+S_z}} - 1 \right) \right) \\ &\approx -\frac{d_a}{d_0} \frac{1}{Y_c} p + \frac{d_0 - d_a}{2 d_0} S_z \end{aligned} \quad (5.6)$$

Aufgelöst nach der relativen Auslenkung S_z ergibt sich die folgende Gleichung für einen nicht ideal kontaktierten Elastomerstapelaktor:

$$S_z = -\frac{2d_a}{d_0 + d_a} \frac{1}{Y_c} p \quad (5.7)$$

Wird für den elektrostatischen Druck p der Ausdruck aus Gleichung (2.18) verwendet, ergibt sich eine quasi-implizite Gleichung für die Auslenkung Δz :

$$\frac{-\Delta z}{z_0} \frac{d_0 + d_a}{2d_a} Y_c = \epsilon z_0 \frac{1}{(z_0 - \Delta z)^3} U^2 \quad (5.8)$$

Abbildung 5.7 stellt die gemessenen statischen Auslenkungen exemplarisch für zwei Aktoren im Vergleich mit den Ergebnissen aus Gleichung (5.8) dar und zeigt die gute Übereinstimmung dieses Modells mit den Messwerten. Ergebnisse für weitere Aktoren sind in Abbildung A.1 dargestellt.

Die Parameter der Aktoren in Abbildung 5.7 sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Sie unterscheiden sich vor allem in der Einzelschichtdicke und in der Größe äußerer passiver Schutzschichten. Der Aktor mit 30 μm dicken Einzelschichten besitzt zwei passive Schichten mit jeweils 30 μm , den Aktor mit Einzelschichtdicken von 50 μm umgibt passives Material mit einer Gesamtdicke von fast 600 μm . Durch die Berücksichtigung des unterschiedlichen Anteils von passivem Material und der tatsächlich kontaktierten Schichten gelingt mit Gleichung (5.8) die gute Vorhersage der statischen Auslenkung in Abbildung 5.7.

Somit erlangt dieses Modell des nichtidealen Stapelaktors besonders dann Bedeutung, wenn der Aktor nicht nur aus aktorischen Schichten sondern zusätzlichen passiven Deck- oder Schutzschichten besteht. Exemplarisch zeigt Abbildung 5.8 die resultierende Dehnung eines Aktors mit einer Einzelschichtdicke $z_0 = 50 \mu\text{m}$ ohne Schutzschichten. Abbildung 5.9 stellt die relative Auslenkung für einen alternativen Aktor mit der gleichen Einzelschichtdicke aber zwei zusätzlichen Schutzschichten mit einer Dicke von jeweils $z_{\text{schutz}} = 100 \mu\text{m}$ dar. Es ist zu erkennen, dass für dieses Beispiel 20 zusätzliche Aktorschichten notwendig sind, um eine relative Auslenkung von 8 % zu erreichen.

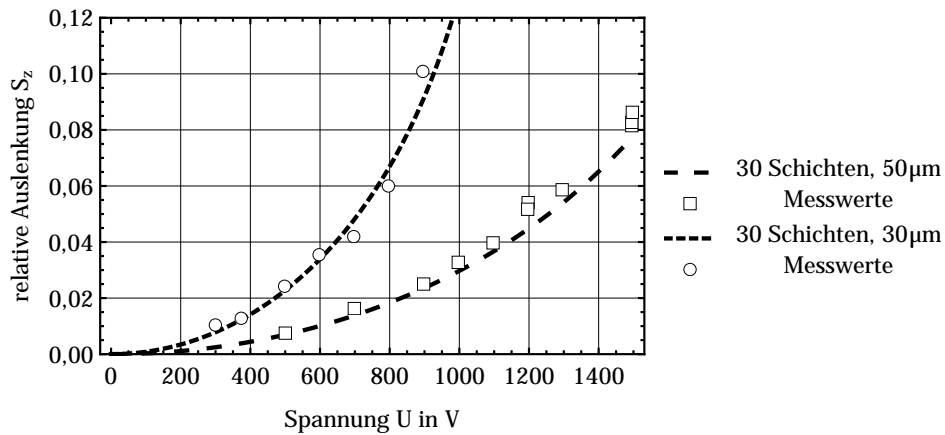


Abbildung 5.7: Vergleich der gemessenen relativen Auslenkung und der Vorhersage aus der Modellgleichung (5.8).

Tabelle 5.1: Parameter der Aktoren in Abbildung 5.7

Parameter	Einheit	Aktor 1	Aktor 2
Aktorschichten n	1	30	30
Dicke Einzelschicht z_0	μm	50	30
Dicke Schutzschichten z_{schutz}	μm	581	60
Gesamtdicke d_0	μm	2081	960
Anzahl kontaktierter Schichten n_{aktiv}	1	21	17
aktive Dicke d_a	μm	1020	510
passive Dicke d_p	μm	1061	450

5.2.2 Dynamische Auslenkung

Um die dynamische Auslenkung der Aktoren zu beschreiben, wird zunächst ein Modell des dynamischen Materialverhaltens benötigt. Hieraus kann dann die Auslenkung berechnet werden, die sich durch den elektrostatischen Druck ergibt, wenn an die Aktoren eine sinusförmige Spannung angelegt wird.

Dynamisches Materialmodell

Die in Abbildung 5.3 gezeigten Sprungantworten entsprechen dem typischen Verhalten viskoelastischer Materialien. Das Material reagiert auf einen mechanischen Spannungssprung zunächst mit einem initialen Dehnungssprung. Danach führt der exponentielle Verlauf des *Kriechens* auf die statische Enddehnung.

Desweiteren typisch für viskoelastische Materialien ist die *Relaxation* des Spannungsverlaufs bei einem Dehnungssprung.

Das zeitabhängige Spannungs-Dehnungsverhalten der Aktoren hat daher einen elastischen Anteil, der durch den Hook'sche Elastizitätsmodul Y beschrieben wird:

$$T = Y \cdot S_z \quad (5.9)$$

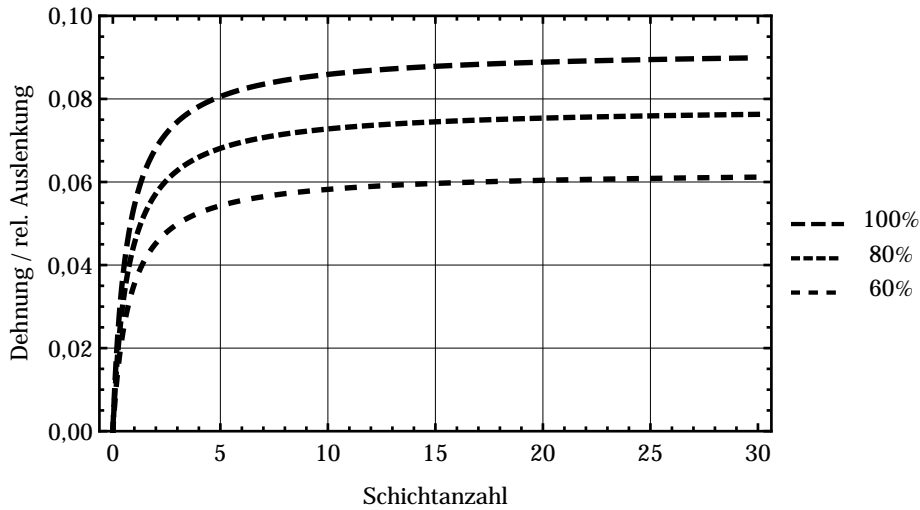


Abbildung 5.8: Vergleich der auf die Gesamtdicke bezogenen Auslenkung für einen Aktor ohne Schutzschichten in Abhängigkeit der Anzahl kontaktierter Schichten im Stapelaktor.

Zusätzlich gibt es einen geschwindigkeitsabhängigen Anteil, der durch die Newton'sche Viskosität η beschrieben wird:

$$T = \eta \frac{dS_z}{dt} \quad (5.10)$$

Die beiden Phänomene Kriechen und Relaxation können anschaulich mit Hilfe konzentrierter Feder- und Dämpferelemente beschrieben werden. Das Maxwell-Modell ist in der Lage durch eine Reihenschaltung von Feder und Dämpfer das Relaxieren des Materials nach einem mechanischen Spannungssprung abzubilden, siehe Abbildung 5.11(a). Der Kriecheffekt wird hingegen mit Hilfe einer Parallelschaltung von Feder und Dämpfer durch das Kelvin-Voigt-Modell beschrieben, siehe Abbildung 5.11(b) [Gen92].

Diese Modelle sind rein phänomenologischer Natur, es liegt ihnen kein tiefergehendes physikalisches Prinzip zugrunde [Pfi06]. Beide sind nur in der Lage, jeweils eines der Phänomene Kriechen und Relaxation zu beschreiben. Um beide Effekte darzustellen, bietet sich daher die Kombination von Maxwell- und Kelvin-Voigt-Modell zum Standard-Festkörpermodell an, siehe Abbildung 5.12 [Hau04].

Die Beschreibung der Materialeigenschaften anhand dieser drei Modelle erfolgt in der Regel im Zeitbereich durch die Lösung der entsprechenden Differential- und Integralgleichungen. Eine andere Betrachtungsweise ist möglich, wenn man sich die Analogie der Differentialgleichungen mechanischer und elektrischer Netzwerke zunutze macht. Hierzu werden Spannung u und Geschwindigkeit v sowie Strom i und Kraft F zueinander in Beziehung gesetzt [LPW01]:

$$\begin{aligned} v &\longrightarrow u \\ F &\longrightarrow i \end{aligned}$$

Aufgrund der gewählten Differenzgrößen Spannung u und Geschwindigkeit v bzw. Flussgrößen Strom i und Kraft F ist die mechanische Impedanz Z als Quotient aus Kraft F und Geschwindigkeit v definiert:

$$Z = \frac{F}{v} \quad (5.11)$$

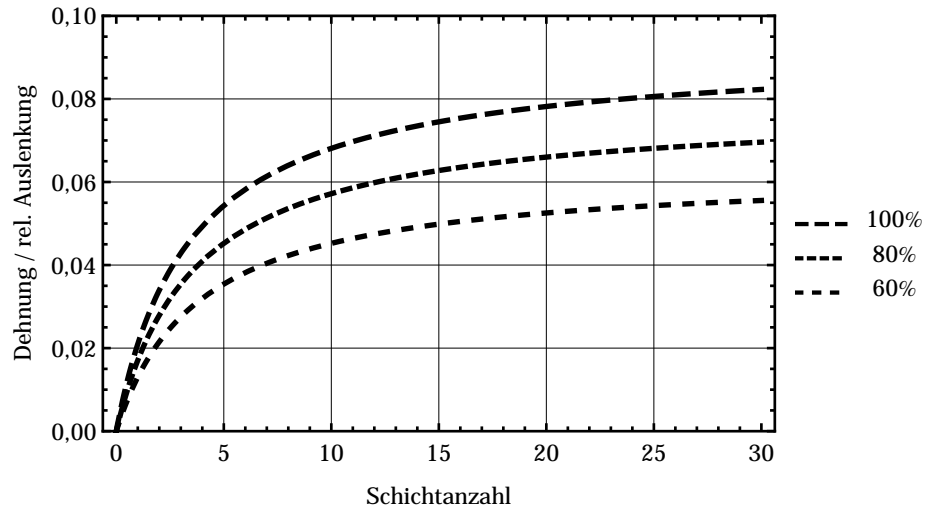


Abbildung 5.9: Vergleich der auf die Gesamtdicke bezogenen Auslenkung für einen mit $2 \times 100 \mu\text{m}$ dicken Schutzschichten in Abhängigkeit der Anzahl kontaktierter Schichten im Stapelaktor.

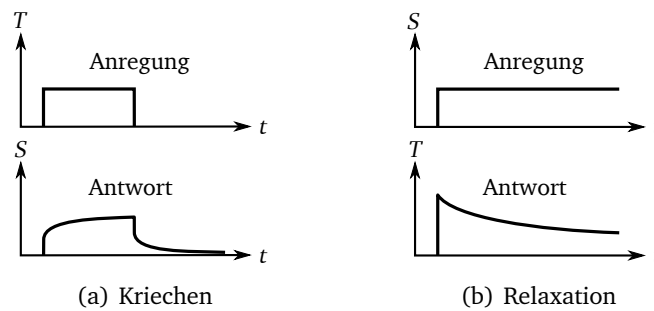


Abbildung 5.10: Antworten eines viskoelastischen Materials auf Sprunganregungen durch eine mechanische Spannung bzw. Dehnung.

Die Impedanzen mechanischer Bauelemente lauten damit für eine Feder mit Federkonstante k :

$$Z_{\text{Feder}} = \frac{k}{j\omega} \quad (5.12a)$$

Für einen Dämpfer mit Dämpfungskoeffizient c :

$$Z_{\text{Dämpfer}} = c \quad (5.12b)$$

Und für eine Masse m :

$$Z_{\text{Masse}} = j\omega m \quad (5.12c)$$

Das Standard-Festkörpermodell besitzt demnach die Impedanz Z_{SFK} , die sich aus der Reihen- und Parallelschaltung der drei Bauelemente ergibt:

$$Z_{\text{SFK}} = \frac{k_2}{j\omega} + \frac{1}{\frac{j\omega}{k_1} + \frac{1}{c_1}} \quad (5.13)$$

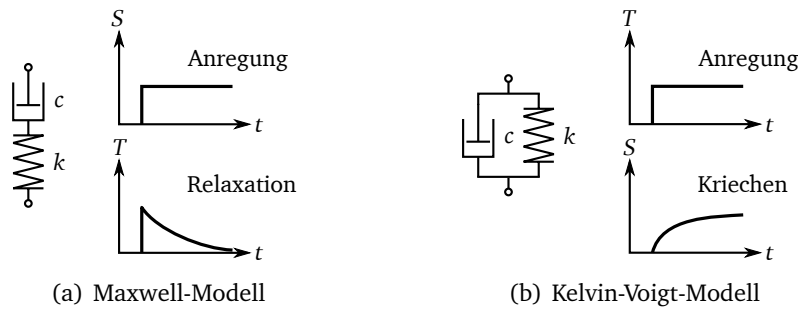


Abbildung 5.11: Modellierung von Spannung und Dehnung durch das Maxwell- und Kelvin-Voigt-Modell.

Wird die mechanische Impedanz des Materials bei verschiedenen Frequenzen gemessen, können die Bauteilparameter und damit die Materialeigenschaften durch eine Kurvenanpassung aus den Messwerten extrahiert werden.

Abbildung 5.13 zeigt den Verlauf der gemessenen Impedanzwerte eines dielektrischen Stapelaktors mit 30 Schichten und einer Schichtdicke von 30 μm . Der dargestellte Frequenzbereich ist durch den Messbereich des verwendeten Messsystems beschränkt [Mat03]. Der Arbeitsfrequenzbereich oberhalb 10 Hz der Aktoren wird aber vollständig abgebildet.

Weiterhin zeigt dieses Diagramm den frequenzabhängigen Verlauf der Impedanz des Standard-Festkörpermodells mit an die Messwerte angepassten Bauteilparametern. Die Werte der Bauteilparameter sind in Tabelle 5.2(b) aufgeführt.

Es ist zu erkennen, dass die mechanische Impedanz des dielektrischen Elastomerstapelaktors bis zu einer Frequenz von etwa 200 Hz durch das Standard-Festkörpermodell gut wiedergegeben wird. Oberhalb dieser Frequenz weicht das Modell zunehmend von den Messwerten ab.

Tabelle 5.2: Geometrieparameter des Aktors und aus den Messwerten in Abbildung 5.13 abgeleitete Parameter seines Standard-Festkörpermodells

Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
Aktorschichten n	1	30	Federkonstante k_1	kN/m	27,1
Schichtdicke z_0	μm	40	Federkonstante k_2	kN/m	8,88
Gesamtdicke d_0	μm	1240	Dämpfungskoeffizient c_1	Ns/m	210
Aktorfläche A	mm^2	25			

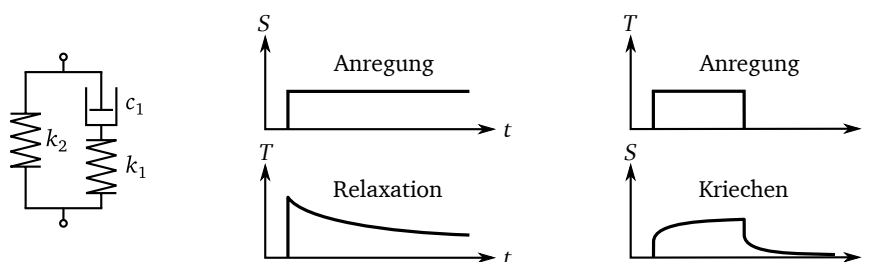


Abbildung 5.12: Das Standard-Festkörpermodell ist eine Kombination aus Maxwell- und Kelvin-Voigt-Modell.

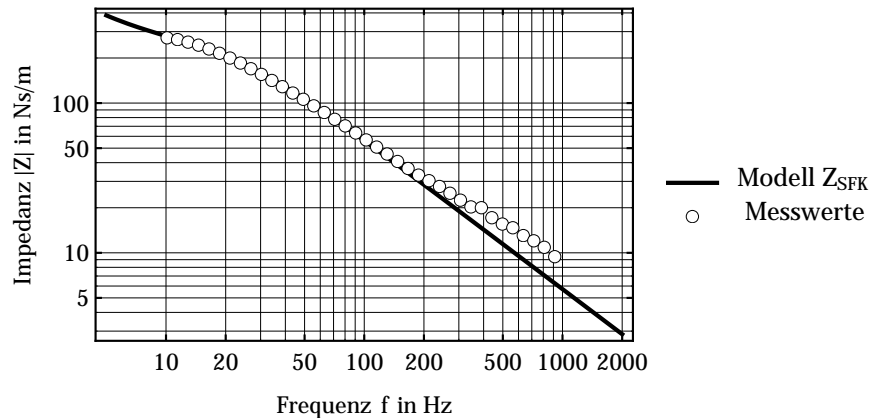


Abbildung 5.13: Gemessene mechanische Impedanz eines dielektrischen Stapelaktors und Verlauf der Impedanz des angepassten Standard-Festkörpermodells. Dargestellt ist jeweils der Betrag der Impedanz, die Anzahl der dargestellten Messpunkte ist reduziert.

Die Bauteilparameter in Tabelle 5.2(b) sind auf die Geometrie des Messobjektes bezogene Größen. Tabelle 5.3 stellt die Parameter als geometrieunabhängige Größen für dielektrische Elastomerstapelaktoren dar.

Tabelle 5.3: Aus den Parametern des Standard-Festkörpermodells abgeleitete Eigenschaften dielektrischer Elastomerstapelaktoren

Parameter	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul Y_1	MPa	1,34
Elastizitätsmodul Y_2	kPa	440
Dämpfungsmodul η_1	kPa s	10,4

Der Wert für das statische Elastizitätsmodul Y_2 liegt mit 440 kPa über den Werten für das reine Silikonmaterial, die in Abschnitt 3.1.1 dargestellt sind. Allerdings haben bereits die Untersuchungen an Aktorelementen im vorangegangenen Kapitel gezeigt, dass das Aktormaterial im Bereich der aktiven Aktorfläche einen höheren Wert für das Elastizitätsmodul aufweist. Auch dort wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich die Geometrie des Silikonprobekörpers von der Größe der Aktorelemente deutlich unterscheidet. Die Randbedingungen bei der Messung des kompressiven Elastizitäts- bzw. uniaxialen Kompressionsmoduls und der Messung der mechanischen Impedanz sind sich sehr ähnlich. In beiden Fällen wird die Kraft durch einen Stift eingeleitet. Wie im aktiven Aktorbetrieb sind die Aktorelemente von passivem Elastomermaterial umgeben, dieses ist allerdings an keiner Stelle fest eingespannt.

Aus den Werten für die gedämpfte Feder k_1 und den Dämpfer c_1 lässt sich aus den vorliegenden Messwerten schließen, dass das statische Elastizitätsmodul das Aktorverhalten bis zu einer Frequenz

$$f_{\text{stat}} = \frac{k_1}{2\pi c_1} \approx 20 \text{ Hz} \quad (5.14)$$

maßgeblich bestimmt.

Um die Abweichung zwischen Messung und Modell oberhalb 200 Hz zu erklären, sind die oben genannten Modelle bestehend aus drei klassischen Federn bzw. Dämpfern nicht direkt geeignet. Eine Möglichkeit wäre, das Standard-Festkörpermodell durch weitere parallel geschaltete

Maxwell-Glieder zu ergänzen [Gen92]. Durch eine geschickte Wahl der Bauteilparameter können so Impedanzverläufe erreicht werden, die in einem gewissen Bereich eine geringere Steigung als 20 dB/dek aufweisen.

Durch die stark erhöhte Anzahl der Modellparameter ist es für Algorithmen wesentlich schwieriger, sinnvolle Parametersätze aus den Messwerten zu extrahieren [SG01]. Eine andere Möglichkeit, das Modell besser anzupassen, besteht darin, Bauteile mit einer fraktionalen Frequenzabhängigkeit einzuführen.

Grundlage hierfür ist, die mechanische Impedanz durch Differentialgleichungen mit Ableitungen einer nicht ganzzahligen Ordnung zu beschreiben. Erstmals hat dies GEMANT vorgeschlagen [Gem36]. In den 1980er Jahren konnten TORVIK und BAGLEY das Auftreten fraktionaler Ableitungen physikalisch begründen [TB84]. Eine tiefergehende Diskussion der mathematischen Grundlagen über die Entwicklung viskoelastischer Materialmodelle mit fraktionalen Ableitungen findet sich beispielsweise in der Arbeit von PFITZENREITER [Pfi06].

Für die Darstellung der mechanischen Eigenschaften des Dielektrikums ist es ausreichend, das Dämpfungselement in Abbildung 5.12 durch ein Element mit fraktionaler Ableitung zu ersetzen. Es besitzt die Impedanz

$$Z_{\text{frak}} = \frac{p}{(j\omega)^\beta} \quad (5.15)$$

mit dem Proportionalitätsparameter p und der Ordnung β der fraktionalen Ableitung. Die Größe $j\omega$ im Nenner der Gleichung (5.15) erweckt den Eindruck einer Integration anstelle einer Differentiation. Dies steht nicht im Widerspruch zu der oben genannten Darstellung fraktionaler Ableitungen. Üblicherweise werden die Differentialgleichungen zur Beschreibung viskoelastischer Materialien in Abhängigkeit der Bewegungsvariablen x dargestellt. Da die mechanische Impedanz gemäß Gleichung (5.11) über die Geschwindigkeit v definiert ist, ergibt sich die Position von $j\omega$ im Nenner automatisch.

Für die beiden Extremfälle $\beta = 0$ und $\beta = 1$ zeigt das fraktionale Element gerade das oben beschriebene Verhalten des Dämpfungsgliedes bzw. des Federelementes.

Im Ersatzschaltbild des erweiterten Standard-Festkörpermodells in Abbildung 5.14 wird das fraktionale Element durch eine Raute dargestellt [Koe84].

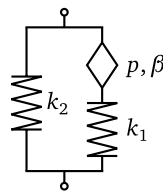


Abbildung 5.14: Ersatzschaltbild des erweiterten Standard-Festkörpermodells mit fraktionalem Element.

Die Impedanz beträgt analog zu Gleichung (5.13):

$$Z_{\text{eSFk}} = \frac{k_2}{j\omega} + \frac{1}{\frac{j\omega}{k_1} + \frac{(j\omega)^\beta}{p}} \quad (5.16)$$

Der Impedanzverlauf dieses erweiterten Festkörpermodells kann nun nochmals an die Messwerte eines dielektrischen Stapelaktors angepasst werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.15 zu sehen.

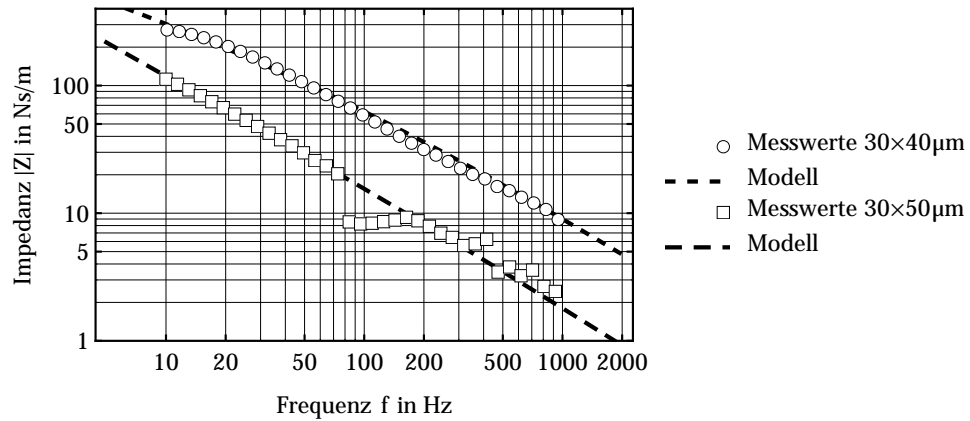


Abbildung 5.15: Vergleich gemessener mechanischer Impedanzen mit den Modellkurven des erweiterten Standard-Festkörpermodells mit fraktionalem Element.

Auch oberhalb von 200 Hz kann das Modell die realen Impedanzverläufe gut nachbilden. Aus den Modellparametern für das Objekt mit $30 \cdot 50 \mu\text{m}$ dicken Aktorschichten ergeben sich die in Tabelle 5.4 angegebenen geometrieabhängigen Modellparameter¹.

Tabelle 5.4: Aus den Messwerten in Abbildung 5.15 abgeleitete Parameter des erweiterten Standard-Festkörpermodells

Parameter	Einheit	Wert
Federkonstante k_1	kN/m	7,24
Federkonstante k_2	kN/m	5,03
Parameter p	Ns^β/m	386
Ordnung β	1	0,5

Die entsprechenden geometrieunabhängigen Modellparameter sind in Tabelle 5.5 angegeben. Für das statische Elastizitätsmodul Y_2 ergibt sich mit diesem Modell nahezu der gleiche Wert, wie durch die Messung des statischen Elastizitätsmoduls, siehe Aktor P78-4 in Abbildung 5.5. Im Gegensatz zum Standard-Festkörpermodell ist der statische Elastizitätsmodul nur bis zu einer Frequenz

$$f = \frac{k_1}{2\pi p} \approx 3 \text{ Hz} \quad (5.17)$$

dominant.

Dynamisches elektromechanisches Modell

Abbildung 5.16 zeigt die elektromechanische Wandlungskette im dielektrischen Elastomerstapel-aktor.

Die den Aktor anregende Hochspannung $u(t)$ hat einen sinusförmigen Verlauf mit einer Frequenz f_{elektr} und einer Amplitude U_0 :

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t) \quad \text{mit} \quad \omega = 2\pi f_{\text{elektr}} \quad (5.18)$$

¹ Der Einbruch der Messwerte am Messobjekt mit 30 Schichten muss der allgemeinen Geometrie dieses Aktors zugeschrieben werden und kann im Rahmen dieser Modellierung nicht weiter begründet werden.

Tabelle 5.5: Aus den Parametern des erweiterten Standard-Festkörpermodells abgeleitete Eigenschaften dielektrischer Elastomerstapelaktoren

Parameter	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul Y_1	kPa	502
Elastizitätsmodul Y_2	kPa	349
Modul P	kPa s $^\beta$	26,8
Ordnung β	1	0,5

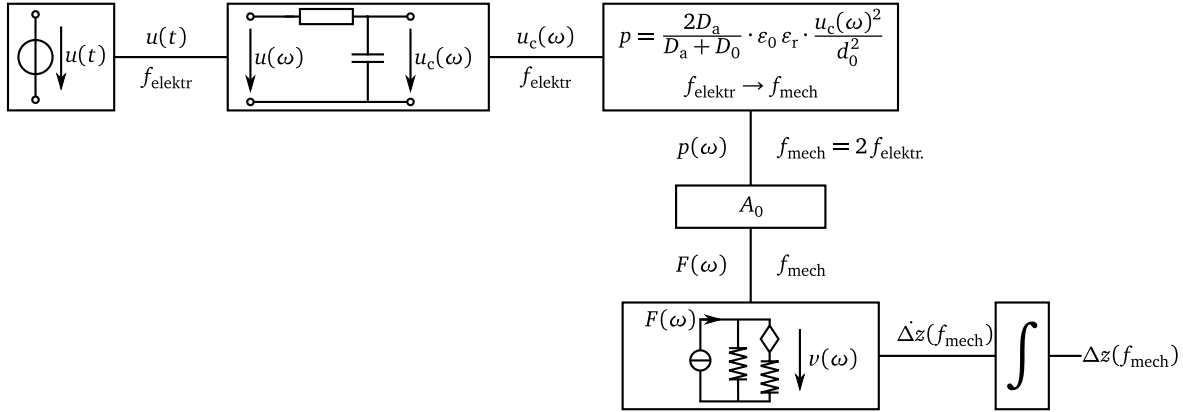


Abbildung 5.16: Blockschaltbild der elektromechanischen Wandlungskette im dielektrischen Elastomerstapelaktor.

Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt ist, kann die Spannung an den Elektroden eines dielektrischen Stapelaktors durch ein einfaches RC-Glied beschrieben werden:

$$u_c(\omega) = U_0 \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (5.19)$$

Aus der Spannung an den Aktorelektroden ergibt sich der elektrostatische Druck p im Aktor gemäß Gleichung (2.19).

$$p(\omega_{\text{mech}}) = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{|u_c(\omega_{\text{elektr}})|^2}{d_0^2} \quad (5.20)$$

Im Gegensatz zu Abschnitt 5.2.1 kann hier die genäherte Formel verwendet werden, da die dynamischen Auslenkungen der Aktoren kleiner als die statischen Auslenkungen sind. Es ist zu beachten, dass an dieser Stelle aufgrund der Quadrierung der $\sin \omega t$ Funktion eine Frequenzverdoppelung auftritt, sodass gilt:

$$\omega_{\text{mech}} = 2\omega_{\text{elektr}} \quad (5.21)$$

Durch Multiplikation mit der Ursprungsgröße A_0 der aktiven Aktorfläche ergibt sich ein Kraftverlauf $F(\omega_{\text{mech}})$, der nun die Anregung für das mechanische Modell des Aktors darstellt. Aufgrund der Definition der mechanischen Impedanz über die Geschwindigkeit muss noch eine Integration vollzogen werden, um den frequenzabhängigen Verlauf der Aktorauslenkung Δz zu erhalten. Auch hier wird analog zu Gleichung (5.7) das Verhältnis von aktivem Material D_a und der Gesamtdicke D_0 berücksichtigt:

$$\Delta z(\omega_{\text{mech}}) = \frac{1}{j\omega_{\text{mech}}} \cdot \frac{2D_a}{D_0 + D_a} \cdot \frac{F(\omega_{\text{mech}})}{Z_{\text{eSFK}}(\omega_{\text{mech}})} \quad (5.22)$$

Die mechanische Impedanz des erweiterten Standard-Festkörpermodells Z_{eSFK} wird aus Gleichung (5.16) übernommen.

Zusammenfassend gilt daher mit den Gleichungen (5.19), (5.20) und (5.22) für die dynamische Auslenkung dielektrischer Stapelaktoren:

$$\Delta z(\omega_{\text{mech}}) = \frac{1}{2j\omega_{\text{elektr}}} \cdot \frac{2D_a}{D_0 + D_a} \cdot \frac{1}{Z_{\text{eSFK}}(2\omega_{\text{elektr}})} \cdot \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A_0 U_0^2}{d_0^2} \cdot \left| \frac{1}{1 + j\omega RC} \right|^2 \quad (5.23)$$

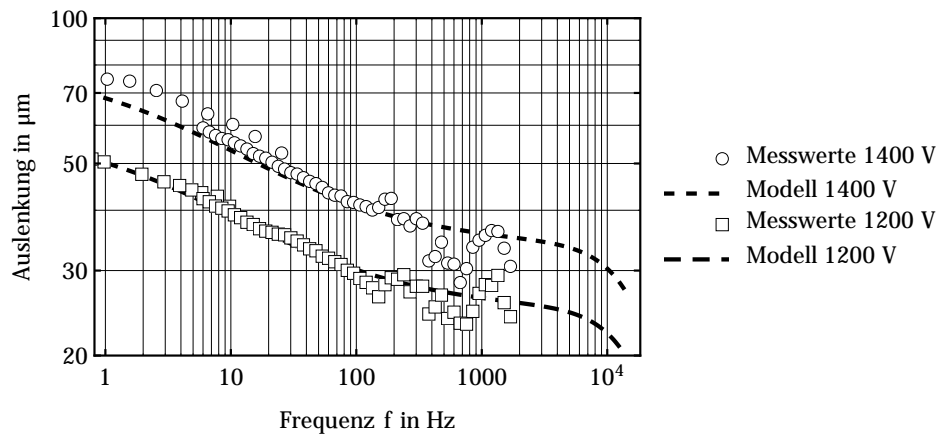
Abbildung 5.17 zeigt die Auslenkungsfrequenzgänge von zwei Aktoren und die Vorhersagen durch das oben beschriebene Modell. Die zugrundeliegenden Aktorparameter sind in Tabelle 5.6 angegeben. Der allgemeine Verlauf kann für die unterschiedlichen Ansteuerspannungen zwischen 1200 V und 1400 V gut wiedergegeben werden. Die größeren Schwankungen oberhalb 200 Hz werden nicht durch das Modell erfasst. Es ist auch zu erkennen, dass erst bei einer Frequenz oberhalb 10 kHz die Grenzfrequenz des elektrischen RC-Gliedes erreicht wird.

Die Verringerung der Auslenkung bei höheren Frequenzen ist deutlich zu erkennen. Allerdings erstreckt sich die Verringerung auf die Hälfte der maximalen Auslenkung über mehr als zwei Dekaden. Wie auch das erweiterte Festkörpermodell zeigt, ist der Abfall nicht mit ausgeprägten Dämpfungseigenschaften des Dielektrikums oder mit einer zu geringen Leitfähigkeit der Elektroden zu begründen.

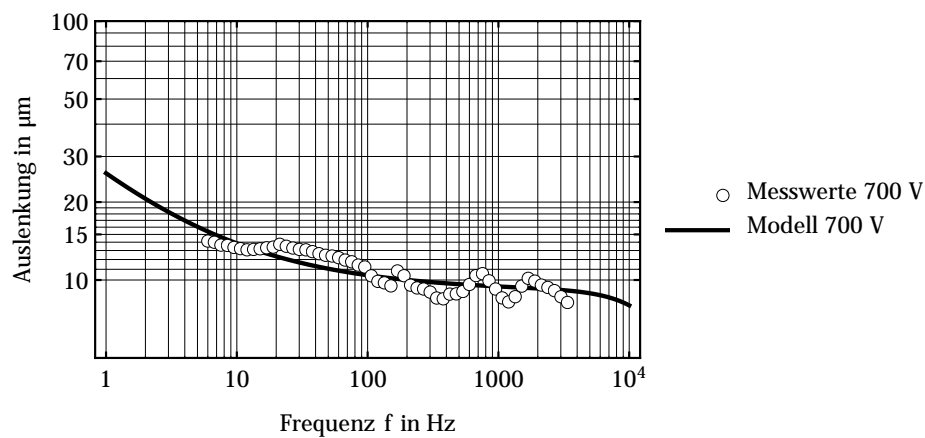
Die hier gezeigten Messwerte erstrecken sich hinab bis zu 1 Hz. Wie später in Abschnitt 7.4 gezeigt wird, erreichen die Aktoren selbst bei 0,1 Hz noch nicht die Werte der in Abschnitt 5.2.1 gezeigten statischen Auslenkung. Die mit Gleichung (5.17) vorhergesagte Grenzfrequenz von 3 Hz kann daher auch nur als obere Grenze angesehen werden. Bei der Betrachtung des mechanischen Verhaltens bei diesen niedrigen Frequenzen ist aber auch zu beachten, dass die Messung der mechanischen Impedanz mit dem zur Verfügung stehenden Messsystem erst ab Frequenzen von 10 Hz möglich ist. Die Extrapolation der Modellbeschreibung bis zu diesen niedrigen Frequenzen kann daher nur eine grobe Orientierung bieten.

Tabelle 5.6: Modellparameter zu Abbildung 5.17

Parameter	Einheit	Aktor (a)	Aktor (b)
Aktorfläche A_0	mm ²	30	25
Schichtdicke z_0	µm	50	40
aktive Dicke D_a	µm	1020	818
Gesamtdicke d_0	µm	2081	1240
nom. Kapazität C	nF	0,46	0,49
Schichtwiderstand R	kΩ	50	50



(a) Aktoraufbau: $30 \times 50 \mu\text{m}$, 30 mm^2



(b) Aktoraufbau: $40 \times 30 \mu\text{m}$, 25 mm^2

Abbildung 5.17: Vergleich der Auslenkungsfrequenzgänge von zwei Aktoren bei unterschiedlichen Spannungsamplituden und dem elektromechanischen Modell.

6 Konzept der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomeraktoren

Die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Realisierung einer kontinuierlichen peristaltischen Pumpe mit Hilfe dielektrischer Elastomerstapelaktoren hat in erster Linie das Ziel, ein neues Anwendungsfeld für dielektrische Elastomeraktoren aufzuzeigen. Im Gegensatz zu den bisher in der Literatur oft vorgestellten diskreten Linearaktoren handelt es sich hierbei um ein vollintegriertes Fluidfördersystem. Aufgrund der Neuheit dieser Material- und Aktortechnologie sollen erste Funktionsmuster die Tauglichkeit und Machbarkeit unter Beweis stellen.

6.1 Funktionsweise der peristaltischen Fluidförderung

In den 1960er Jahren begann die wissenschaftliche Untersuchung des peristaltischen Flüssigkeitstransports. Dies geschah zum einen durch die Entwicklung der ersten peristaltischen Schlauchpumpen [Nes04] als auch durch die Betrachtung der peristaltischen Bewegung des Harnleiters durch SHAPIRO, JAFFRIN und WEINBERG. Sie waren die ersten, die den Fluidtransport für eine verschwindende Reynoldszahl und eine lange Wellenlänge in einem ebenen oder achsensymmetrischen Kanal analytisch beschrieben [SJW69].

Für die Erklärung der Strömungsverhältnisse in einem Kanal betrachteten SHAPIRO, JAFFRIN und WEINBERG den in Abbildung 6.1 gezeigten peristaltisch verformten Kanal. Dieser Kanal ist im oberen Teil in einem stationären Koordinatensystem dargestellt. Der elastische Kanal wird durch zwei Backen verengt aber nicht vollständig verschlossen, die sich mit der Geschwindigkeit c nach rechts in Richtung der Kanalachse bewegen. Der Kanal sei dabei an beiden Enden verschlossen, es existiert daher keine Strömung entlang der Kanalachse.

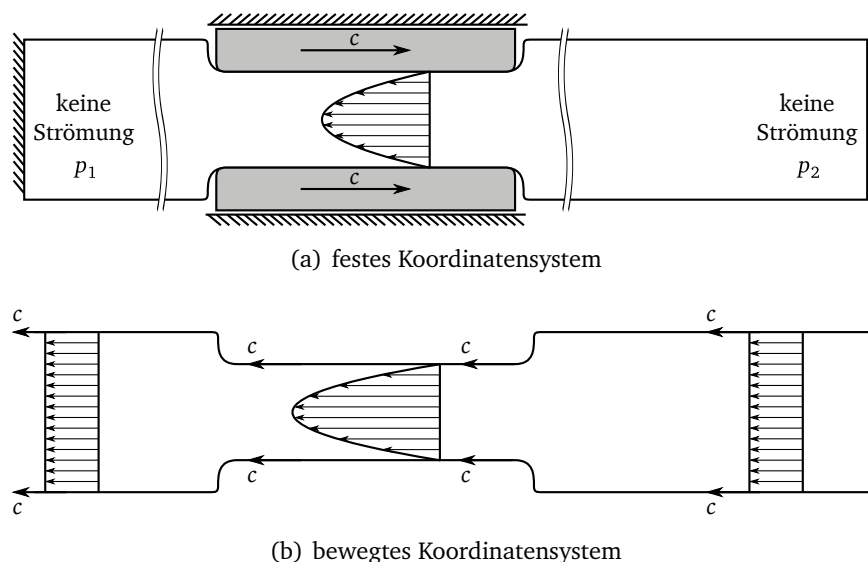


Abbildung 6.1: Prinzipielle Darstellung der Strömungsverhältnisse in einem peristaltisch verformten Kanal.

Betrachtet man die gleiche Situation im mitbewegten Koordinatensystem, so ist die Kanalverengung stationär, da das Koordinatensystem mit der gleichen Geschwindigkeit c bewegt wird.

Infolgedessen bewegen sich die Kanalwände mit der Geschwindigkeit c nach links. Da auch hier die Kanalenden verschlossen sind, existiert in den ungestauchten Bereichen des Kanals dementsprechend eine gleichförmige Propfenströmung ohne seitlichen Geschwindigkeitsgradienten.

Aufgrund des geringeren Querschnitts im gestauchten Bereich und der Inkompressibilität des Fluides muss die mittlere Geschwindigkeit des Fluids im Bereich der Kanalverengung größer als die Geschwindigkeit c sein. Die viskose Eigenschaft des Fluides bedingt, dass es an der Kanalwand keinen Geschwindigkeitsunterschied zwischen Wand und Fluid gibt. Im verengten Kanal existiert daher eine Poiseuille-Strömung mit einem parabolischen Geschwindigkeitsgradienten, solange die Trägheit des Fluids vernachlässigt werden kann.

Das parabolische Profil der Poiseuille-Strömung entsteht nur, wenn es auch einen Druckgradienten gibt. Im rechten Teil des Kanals muss also ein höherer Druck herrschen als im linken Teil. Dieses wiederum gilt sowohl für das mitbewegte Koordinatensystem, wie auch für das stationäre Koordinatensystem. Somit existiert auch in diesem Koordinatensystem eine nach links gerichtete Poiseuille-Strömung, deren Geschwindigkeit an den Kanalwänden verschwindet. Und es herrscht im rechten Teil des Kanals ein höherer Druck, sodass

$$\Delta p = p_2 - p_1 > 0 \quad (6.1)$$

gilt. Werden die Kanalenden geöffnet, wird das Fluid nach rechts transportiert und der Betrag der Poiseuille-Strömung verringert sich.

Die Viskosität der Flüssigkeit ist also eine notwendige Voraussetzung, damit eine Strömung aufgrund einer peristaltischen Wandbewegung entsteht [SJW69].

Zur Beschreibung des peristaltischen Systems sind die Parameter einer peristaltischen Wandbewegung maßgeblich, wie sie in Abbildung 6.2 dargestellt sind. Das Amplitudenverhältnis α ist ein Maß für die Wandverformung b bezogen auf die mittlere Kanalhöhe a . Ähnliche Bedeutung hat die Spaltbreite g , die den minimalen Abstand der verformten Wände angibt. Je nach Verwendung kann das dimensionslose Amplitudenverhältnis oder die dimensionsbehaftete Spaltbreite verwendet werden. Die Wellenordnung δ zeigt das Verhältnis der Kanalhöhe a zur Wellenlänge λ der Pumpe. Die Wellenanzahl ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Wellenlänge und Gesamtlänge L der Pumpe.

$$\text{Amplitudenverhältnis} \quad \alpha = \frac{b}{a}$$

$$\text{Spaltbreite} \quad g = 2 \cdot (a - b)$$

$$\text{Wellenordnung} \quad \delta = \frac{a}{\lambda}$$

$$\text{Wellenanzahl} \quad n = \frac{L}{\lambda}$$

Die Reynoldszahl Re ist ein Maß für das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und viskosen Reibungskräften. Für eine peristaltische Pumpe kann die Reynoldszahl nach SHAPIRO, JAFFRIN und WEINBERG mit Hilfe der folgenden Gleichung abgeschätzt werden: [SJW69]

$$Re = \frac{a c}{\nu} \cdot \frac{a}{\lambda} \quad (6.2)$$

Es ist zu erkennen, dass die Reynoldszahl quadratisch von der mittleren Kanalhöhe a der peristaltischen Pumpe abhängt. Die Wellenlänge λ der Wandverformung und deren Geschwindigkeit c sowie die kinematische Viskosität ν haben lediglich linearen bzw. reziproken Einfluss.

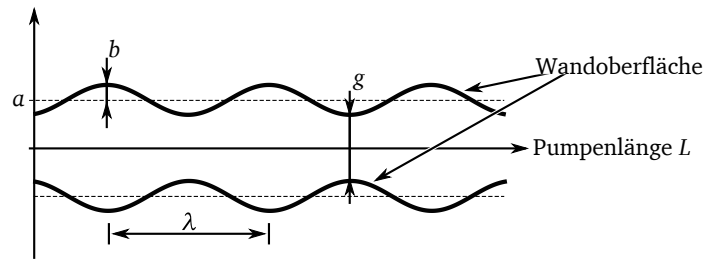


Abbildung 6.2: Parameter eines peristaltischen Systems mit einem ebenen Kanal.

Der Zusammenhang zwischen Druckerhöhung Δp und Volumenstrom q_v nimmt für Reynoldszahlen $Re < 0,2$ [SJW69] die Form einer Geradengleichung an [JS71]:

$$q_v = \frac{3\alpha^2}{2 + \alpha^2} - \frac{1}{3\pi} \frac{(1 - \alpha^2)^{\frac{5}{2}}}{2 + \alpha^2} \cdot \Delta p_\lambda \quad (6.3)$$

Da es einen linearen Zusammenhang zwischen der maximalen Druckdifferenz und der Wellenzahl n gibt, wird die Druckdifferenz auf die Wellenzahl n bezogen:

$$\Delta p_\lambda = \frac{\Delta p}{n} \quad (6.4)$$

Üblicherweise wird zur Darstellung der Pumpencharakteristik die Druckerhöhung Δp über dem Volumenstrom q_v aufgetragen. Abbildung 6.3 zeigt, dass eine peristaltische Pumpe für einen kompletten Verschluss des Kanals mit $\alpha = 1$ die senkrechte Kennlinie einer Verdrängerpumpe besitzt. Für kleinere Amplitudenverhältnisse α bzw. größere Kanalöffnungen g wird die Kennlinie seitlich geneigt und sowohl die erreichbare Druckerhöhung Δp als auch der maximale Volumenstrom q_v verringern sich.

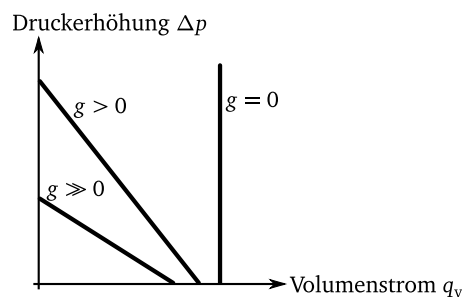


Abbildung 6.3: Allgemeiner Verlauf der Kennlinien peristaltischer Pumpen in Abhängigkeit der verbleibenden Spaltbreite g .

Die abgegebene Leistung P_{hydr} einer Pumpe wird aus dem erzeugten Volumenstrom q_v , der Dichte des geförderten Fluids ρ sowie der Förderhöhe H berechnet:

$$P_{\text{hydr}} = \rho \cdot g \cdot q_v \cdot H \quad (6.5)$$

Die Definition der Förderhöhe H berücksichtigt, dass eine Pumpe auch Energie für den Transport des Fluids durch die Pumpe hindurch aufwenden muss und diese Energie für den Aufbau einer Druckdifferenz zwischen Einlass und Auslass der Pumpe nicht mehr zur Verfügung steht.

$$H = \frac{p_{\text{Auslass}} - p_{\text{Einlass}}}{\rho \cdot g} + h_{\text{Auslass}} - h_{\text{Einlass}} + \frac{v_{\text{Auslass}}^2 - v_{\text{Einlass}}^2}{2g} \quad (6.6)$$

Der zweite Summand dieser Gleichung berücksichtigt die Arbeit der Pumpe, die am Fluid geleistet werden muss, um den Höhenunterschied zwischen Einlass und Auslass zu überwinden. Der dritte Term berücksichtigt die Beschleunigung des Fluids, die dann auftritt, wenn Einlass und Auslass unterschiedliche Querschnittsflächen aufweisen.

6.2 Konzeptvarianten der peristaltischen Fluidförderung mit dielektrischen Elastomerstapelaktoren

Dielektrische Elastomeraktoren erzeugen prinzipbedingt immer eine Kontraktion bzw. Stauchung des elastischen Materials. Die peristaltische Bewegung kann in einer Pumpe aus dielektrischen Elastomerstapelaktoren zwei- oder dreidimensional umgesetzt werden. Letztere adaptiert das biologische Organ in Form einer *Schlauchpumpe* soweit, dass nicht nur das Funktionsprinzip übernommen wird, sondern auch die Geometrie in Gestalt eines zylindrischen Hohlkörpers, dessen Durchmesser zum Transport des Fluids vergrößert und verkleinert wird, siehe Abbildung 6.4(a). Diese Variante wird in Abschnitt 6.2.1 diskutiert.

Hingegen wird in der peristaltischen *Kammerpumpe* nur die Funktionsweise adaptiert, die Formgebung orientiert sich an den technologischen Randbedingungen und verzichtet auf die zylindrische Schlauchgestalt, siehe Abbildung 6.4(b). Die Auslegung und Dimensionierung dieser Pumpenvariante wird in Abschnitt 6.2.2 dargestellt.

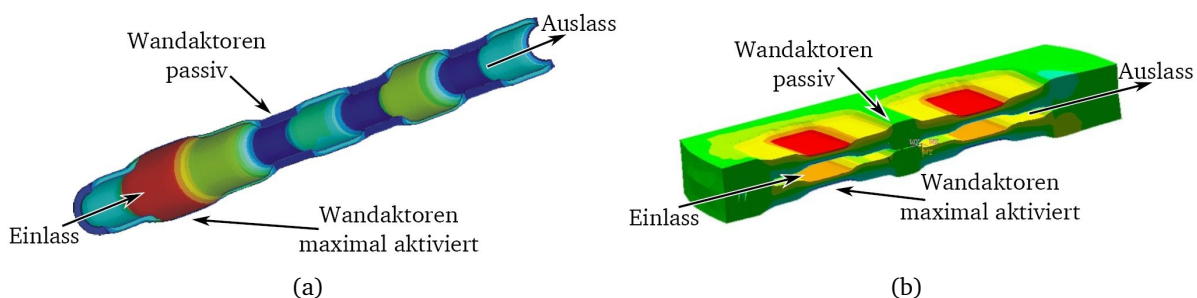


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der beiden Aufbauvarianten einer peristaltischen Pumpe aus Elastomerstapelaktoren. (a) Schlauchpumpe; (b) Kammerpumpe.

6.2.1 Schlauchpumpe

Das erste Gestaltungskonzept sieht den Aufbau der peristaltischen Pumpe als aktive Schlauchpumpe vor. Im Gegensatz zu traditionellen Schlauchpumpen werden keine zusätzlichen mechanischen Bauteile benötigt, die den Schlauch mechanisch verformen und damit den Querschnitt verkleinern. Vielmehr liegt ein aktiver Schlauch vor, der axial in Segmente unterteilt ist, um den Schlauchquerschnitt zu verkleinern bzw. vergrößern, siehe Abbildung 6.4(a).

Die dielektrischen Aktorelemente bilden in dieser Variante direkt die Schlauchwand, wie in Abbildung 6.5 dargestellt ist. Verantwortlich für die Aufweitung des Schlauchdurchmessers ist die Querdehnung des Dielektrikums in Folge der durch die Aktoren verursachten Stauchung parallel zum angelegten elektrischen Feld.

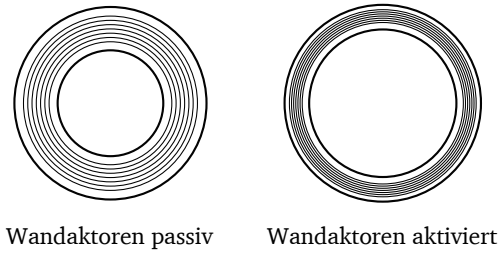


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Elastomeraktoren innerhalb der Schlauchpumpe.

Die Dehnung des Schlauchumfangs S_1 entspricht gerade der Querdehnung aus Gleichung (5.3), wobei sich der Umfang aus der Länge l eines Aktorelementes ergibt.

$$S_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = S_x = \frac{1}{\sqrt{1 - S_z}} - 1 \quad (6.7)$$

Durch einfaches Umstellen erhält man den Zusammenhang zwischen der Länge des Ruheumfangs l_0 und dem Betrag des Umfangs l_1 im gedehnten Zustand.

$$l_0 = l_1 \sqrt{1 - S_z} \quad \Rightarrow \quad l_1 = \frac{l_0}{\sqrt{1 - S_z}} \quad (6.8)$$

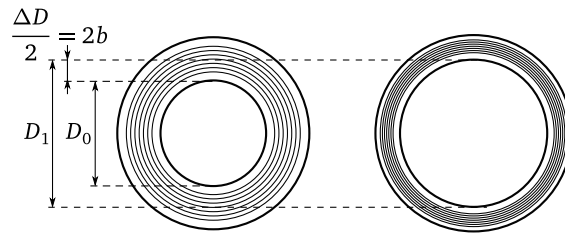


Abbildung 6.6: Bemaßung des Schlauchs im Ruhe- und Dehnungszustand.

Gemäß Abbildung 6.6 ist ΔD die Differenz des Schlauchdurchmessers in Ruhe und im gedehnten Zustand. Die für die fluiddynamische Betrachtung wesentliche Größe ist die Amplitude b dieser Wandverformung. Es gilt daher der Zusammenhang:

$$2b = \frac{D_1 - D_0}{2} \quad (6.9)$$

Mit den einfachen Zusammenhängen zwischen Durchmesser, Radius und Umfang sowie Gleichung (6.8) folgt dann:

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{2} (r_1 - r_0) \\ l &= 2\pi r \quad \text{und} \quad l_1 = l_0 (1 + S_1) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{l_0}{2\pi} (1 + S_1) - r_0 \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi r_0}{2\pi} (1 + S_1) - r_0 \right) \\ b &= \frac{1}{2} r_0 S_1 \end{aligned} \quad (6.10)$$

Setzt man jetzt Gleichung (6.7) für die Querdehnung ein, so ergibt sich für die Amplitude der Schlauchverformung in Abhängigkeit der Aktordehnung S_z :

$$b = \frac{1}{2} r_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - S_z}} - 1 \right) \quad (6.11)$$

Abbildung 6.7 zeigt den Verlauf der Vergrößerung des Schlauchradius in Abhängigkeit der Dehnung der Aktoren in Richtung des elektrischen Feldes.

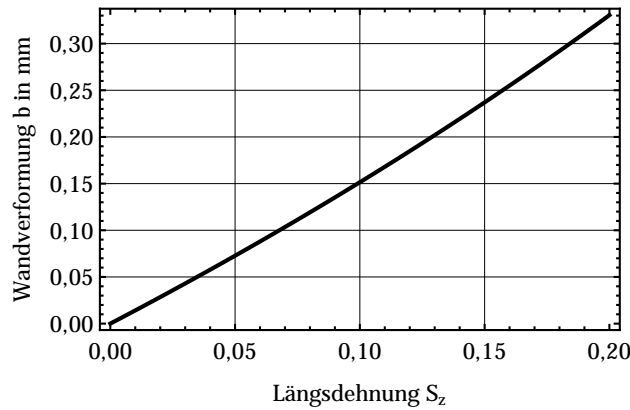


Abbildung 6.7: Abhängigkeit der Amplitude der Schlauchverformung von der Dehnung der Aktoren in Richtung des elektrischen Feldes. Es ist der Dehnungsbetrag der Aktoren aufgetragen.

Aus den kreisrunden Silikonschichten der in Abschnitt 3.3 dargestellten Herstellungstechnologie lassen sich Rechtecke mit einer maximalen Größe von $B = 15$ mm und $L = 35$ mm fertigen. Der Umfang des Schlauches entspricht gerade der Länge der Rechtecke, der Radius des Schlauches ergibt sich daher zu:

$$U = 2 \pi r_0 \quad \Rightarrow \quad r_0 = \frac{U}{2 \pi} = 5,6 \text{ mm} \quad (6.12)$$

Die Breite dieser Aktorelemente bestimmt die Wellenlänge, im Extremfall entspricht die peristaltische Wellenlänge gerade der doppelten Elementbreite:

$$\lambda_{\text{peristal.}} = 2 \cdot B = 30 \text{ mm} \quad (6.13)$$

Bei einer angenommenen Dehnung von $S_z = 10\%$ ist mit einer Aufweitung des Schlauchradius von $2b \approx 300 \mu\text{m}$ zu rechnen. Dies entspricht einer radialen Dehnung von etwa 5,5 %.

Der maximale Schlauchdurchmesser D ist die Summe aus dem Ruhedurchmesser r_0 und der Amplitude b :

$$a = r_0 + b \quad (6.14)$$

Die Reynoldszahl ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 6.1 und gemäß der Formel von SHAPIRO, JAFFRIN und WEINBERG in Gleichung (6.2) zu:

$$Re_{\text{Schlauchpumpe}} \approx 310 \quad (6.15)$$

Dieser Wert liegt weit oberhalb der Grenze $Re < 0,2$, die SHAPIRO, JAFFRIN und WEINBERG für die Anwendbarkeit von Gleichung (6.3) festgelegt haben. Aufgrund dieser großen Abweichung der Reynoldszahl für die vorliegende Geometrie einer peristaltischen Schlauchpumpe, wird von einer weiteren analytischen Betrachtung dieser Pumpe abgesehen. Um dennoch eine Aussage über die Förderleistung dieser Pumpenvarianten treffen zu können, wird diese Geometrie mit Hilfe eines CFD-Systems simuliert.

Tabelle 6.1: Parameter der Schlauchpumpe

Parameter	Einheit	Wert
Ruheradius r_0	mm	5,6
Amplitude b	mm	0,3
Wellenlänge c	mm	30
Wellengeschwindigkeit c	m s^{-1}	0,3
kinematische Viskosität ν	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	10^{-6}

Simulationsergebnisse

Die fluiddynamischen Simulationen erfolgen mit der Software FLUENT v6.2. Es wird eine reine Strömungssimulation berechnet, die Rückwirkung der Strömung auf das mechanische System der sich bewegenden Wand wird nicht betrachtet. Die Strömungsberechnung kann mit Hilfe dieser Software analog zur Erklärung des peristaltischen Effektes zu Beginn dieses Kapitels auf zwei unterschiedliche Arten durchgeführt werden. In der instationären Variante wird die fortschreitende Welle in jedem Zeitschritt neu auf die Pumpenwand projiziert. Das zu Beginn der Simulation erstellte Elementnetz, durch das das Fluid und die Pumpenwand dargestellt werden, wird dadurch immer stärker verzerrt und muss daher in definierten Intervallen zeitaufwändig neu erstellt werden. Der geförderte Volumenstrom ergibt sich in dieser Variante direkt aus der Integration der während einer Wellenperiode am Bezugspunkt vorbeiströmenden Fluidmenge.

Um den hohen Rechen- und Zeitaufwand für die wiederkehrende Vernetzung zu vermeiden, kann in der zweiten Simulationsvariante das Koordinatensystem durch eine stationäre Strömung bewegt werden. Die Bewegung erfolgt entlang der Längsachse der Pumpe, die als y-Achse definiert ist.

Zwischen Auslass und Einlass der Pumpe wird eine statische Druckdifferenz vorgegeben. Je nach Größe der Druckdifferenz entsteht ein Leakagevolumenstrom $q_{v, \text{leak}}$, der stationär berechnet wird. [Ree88].

Im theoretischen Idealfall verschließen die Pumpenwände den Kanal und der maximale Volumenstrom $q_{v, \text{theo}}$ ergibt sich aus dem durch die verformte Wand eingeschlossenen Volumen:

$$q_{v, \text{theo}} = 2a \cdot c \quad (6.16)$$

Der geförderte Volumenstrom q_v ergibt sich dann aus der Differenz aus dem theoretisch möglichen Volumenstrom $q_{v, \text{theo}}$ und dem Leakagestrom:

$$q_v = q_{v, \text{theo}} - q_{v, \text{leak}} \quad (6.17)$$

Beurteilung

Abbildung 6.8 zeigt die Simulationsergebnisse für die Schlauchpumpe. Die Kennlinie für die Anregungsfrequenz $f = 16,7 \text{ Hz}$ zeigt die höchste Pumpleistung: Der Volumenstrom liegt demnach bei

ca. $q_{v, \text{Schlauch}} = 40 \text{ ml s}^{-1}$, die maximale Druckdifferenz, bei der die Nettoströmung praktisch zum Erliegen kommt, beträgt jedoch gerade $\Delta p_{\text{Schlauch}} = 15 \text{ Pa}$.

Von einer *echten* Pumpe kann hier also keine Rede sein. Der Grund für die schwache Druckerhöhung liegt im geringen Verschluss des Pumpenquerschnitts, da die Elastomeraktoren prinzipbedingt nicht in der Lage sind, den Durchmesser des Schlauchs zu verkleinern.

Diese Aufbauvariante wird aus diesem Grund nicht weiter betrachtet.

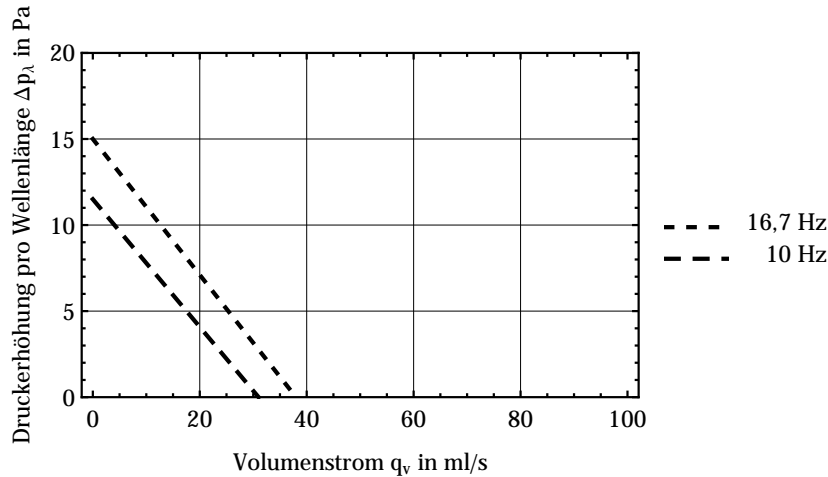


Abbildung 6.8: Errechnete Volumenströme der Schlauchpumpe für Ansteuerfrequenzen 10 Hz und 16,7 Hz.

6.2.2 Kammerpumpe

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Pumpenvariante zeigt zwei Nachteile. Zum Einen sind die Aktoren nicht in der Lage, zu irgendeinem Zeitpunkt den Querschnitt zu verschließen. Zum Anderen wird nicht die direkte Auslenkung der Aktoren genutzt. Stattdessen beruht die Schlauchverformung auf der Materialdehnung senkrecht zum elektrischen Feld, die nur halb so groß wie die Dehnung in Feldrichtung ist. Die zweite Aufbauvariante zeigt diese Nachteile nicht, da wie in Abbildung 6.4(b) gezeigt ist, der Kanal im Ruhezustand vollkommen verschlossen ist und die Aktoren direkt zur Kanalverformung genutzt werden. Es ist daher mit einer wesentlich besseren Leistungsfähigkeit der Kammerpumpe zu rechnen.

Allgemeine Gestaltung

Der in Abschnitt 3.3 dargestellte Herstellungsprozess erlaubt die Integration der Stapelaktoren in einen Silikonkörper. Durch eine geeignete Wahl der Prozessparameter kann zudem der Fluidkanal in der Mitte dieses Körpers während der Herstellung präpariert werden, sodass die gesamte Pumpe quasi-monolithisch aufgebaut wird. In Abschnitt 7.2 wird ausführlich auf die Herstellung und den Aufbau der Pumpe eingegangen.

Für die Anordnung planarer Aktorelemente gibt es aufgrund der Herstellungstechnologie zwei grundlegende Anordnungen. Die Grundgestalt des Silikonkörpers wird hierzu auf Scheiben mit einem Durchmesser $d_{\text{ST}} = 40 \text{ mm}$ beschränkt.

In Abbildung 6.9(a) werden die Aktorelemente analog zum Grundkonzept in Abbildung 6.4(b) hintereinander entlang des Durchmessers der Silikonscheibe angeordnet. Die Variante (b) in Ab-

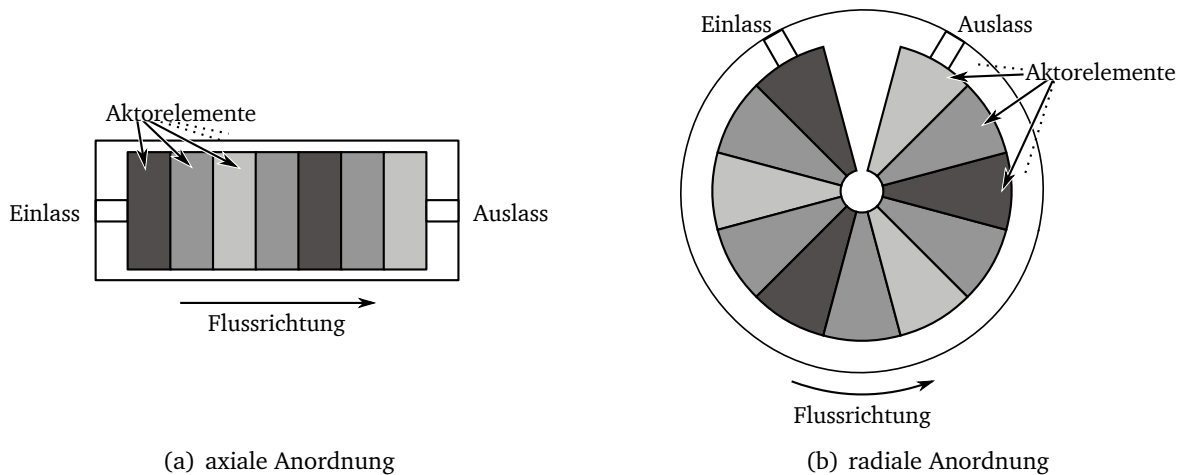


Abbildung 6.9: Die Kammeraktoren können auf zwei verschiedene Weisen im Silikonkörper angeordnet werden. Die Grauschattierungen stellen die unterschiedlichen Aktivierungsgrade der Aktorelemente dar.

Abbildung 6.9 berücksichtigt die grundsätzlich vorhandene Rotationssymmetrie des Silikonkörpers und ordnet die Aktorelemente radial um den Mittelpunkt an.

6.2.2.1 Zirkulare Kammerpumpe

Die Abmessungen der Aktorelemente folgen aus der gegebenen Geometrie des herstellbaren Silikonkörpers. Wie in Abbildung 6.9(b) erkennbar ist, muss eine Barriere zwischen Einlass und Auslass gegeben sein. Vereinfachend wird diese Barriere so groß wie ein Aktorelement gewählt.

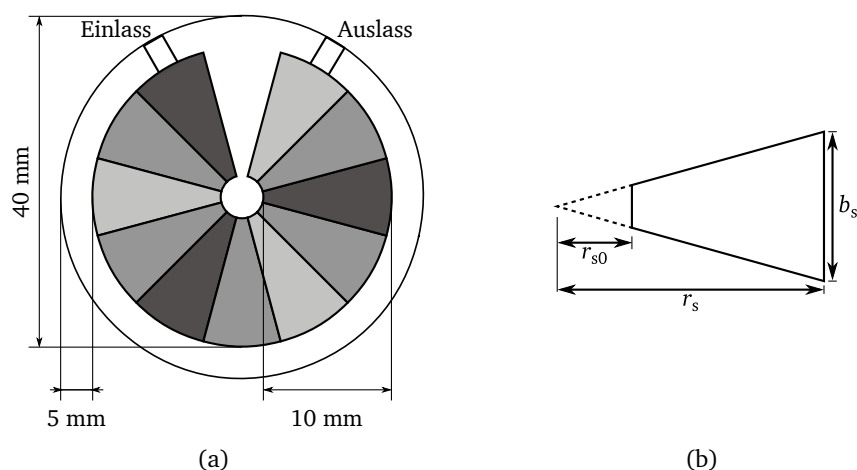


Abbildung 6.10: (a) Abmessungen der Kammerpumpe mit radialer Anordnung der Aktorelemente; (b) Vereinfachte Abmessungen eines einzelnen Segmentes.

Eine erste Abschätzung der möglichen Förderrate erfolgt durch die ideale, rein geometrische Betrachtung. So kann der geförderte Volumenstrom nicht größer als das Volumen sein, das durch die

Kammern wiederholt gebildet und geschlossen wird. Betrachtet man die Form der Aktorelemente als Trapeze, so ergibt sich die Fläche A_r eines radialen Elementes zu:

$$\begin{aligned} A_r &= \frac{1}{2} (r_s - r_{s0}) (b_s + b_{s0}) \\ &= \frac{1}{2} b_s (r_s - r_{s0}) \left(1 + \frac{r_{s0}}{r_s} \right) \end{aligned} \quad (6.18)$$

Wie in Abbildung 6.10 zu erkennen ist, wird der äußere Radius der Aktorelemente auf $r_s = 15 \text{ mm}$ festgelegt. Die Breite b_s eines Elementes am äußeren Umfang ergibt sich durch die Größe und die Anzahl n_A an integrierten Aktorelementen.

$$b_s = \frac{2 \pi \cdot r_s}{n_A + 1} \quad (6.19)$$

Der Nenner ergibt sich aus der gewählten Anzahl an Aktorelementen $n_A = 8$ und der notwendigen Fläche, um Einlass und Auslass zu trennen. Für die Fläche eines Aktorelementes folgt aus den Gleichungen (6.18) und (6.19) sowie den genannten Werten:

$$A_r \approx 70 \text{ mm}^2 \quad \text{mit} \quad r_s = 15 \text{ mm}, \quad r_{s0} = 5 \text{ mm}, \quad b_s = 10,8 \text{ mm} \quad (6.20)$$

Für die Aktorelemente wird bei einem Aufbau mit 100 Aktorschichten eine Dicke von $d_{\text{Aktor}} = 3 \text{ mm}$ angenommen. Die Aktoren erzeugen bei einer durchschnittlichen Dehnung eine Auslenkung von $2b = 0,2 \text{ mm}$. Für eine Ansteuerfrequenz $f = 10 \text{ Hz}$ ergibt sich somit ein idealer Volumenstrom $q_{v, \text{theo}}$:

$$\begin{aligned} q_{v, \text{theo}} &= V_{\text{Kammer}} \cdot f \\ &= 2A_r \cdot b \cdot f \\ &\approx 140 \text{ } \mu\text{l/s} \end{aligned} \quad (6.21)$$

Die zweite charakteristische Größe einer Pumpe ist die maximale Druckdifferenz Δp , die die Pumpe aufzubauen in der Lage ist. Um das verwendete Silikonmaterial um 10 % zu stauchen, ist eine mechanische Spannung $T \approx 20 \text{ kPa}$ notwendig, siehe Abschnitt 3.1.1. Da das Material im Umkehrschluss keinen höheren Druck auf das Fluid ausüben kann, als die im Material herrschende Spannung, kann als Obergrenze für die Druckdifferenz der Kammerpumpe der folgende Wert angegeben werden:

$$\Delta p_{\text{theo}} = 20 \text{ kPa} \quad (6.22)$$

6.2.2.2 Axiale Kammerpumpe

Wie in Abbildung 6.9(a) vorgestellt wurde, sieht die zweite Geometrievariante der Kammerpumpe eine axiale Anordnung der Aktorelemente vor. Diese Anordnung zeichnet sich durch eine wesentlich bessere Zugänglichkeit der Aktorelemente zur Kontaktierung der Elektroden aus, jedoch wird die zur Verfügung stehende Fläche nicht so gut ausgenutzt.

Die Fläche eines Elementes der axialen Anordnung hat folgende Größe:

$$A_a = \frac{L \cdot B}{n_A} \quad (6.23)$$

Wie mit den Gleichungen (6.18) und (6.19) gezeigt, beträgt die Fläche A_r eines Elementes der radialen Anordnung:

$$A_r = \frac{\pi \cdot r_s}{n_A + 1} (r_s - r_{s0}) \left(1 + \frac{r_{s0}}{r_s} \right) \quad (6.24)$$

Setzt man diese Flächen der beiden Anordnungsvarianten zueinander ins Verhältnis, so erhält man:

$$\frac{A_r}{A_a} = \frac{\pi \cdot r_s}{n_A + 1} (r_s - r_{s0}) \left(1 + \frac{r_{s0}}{r_s} \right) \cdot \frac{n_A}{L \cdot B} \quad (6.25)$$

Mit den in Tabelle 6.2 gegebenen Werten der radialen sowie axialen Anordnung, hängt das Flächenverhältnis nur noch von der Kammeranzahl n_A ab:

$$\frac{A_r}{A_a} \approx 1,8 \frac{n_A}{n_A + 1} \quad (6.26)$$

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Parameter der radialen und axialen Kammerpumpe

Parameter	Einheit	Wert
innerer Radius r_{s0}	mm	5
äußerer Radius r_s	mm	15
Kanallänge L	mm	35
Kanalbreite B	mm	10
kinematische Viskosität ν	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	10^{-6}

Für sehr viele Aktorelemente lässt sich so mit der radialen Anordnung die zur Verfügung stehende Fläche nahezu doppelt so gut ausnutzen wie mit der axialen Anordnung. Für die hier betrachtete Anwendung und mit der vorhandenen Technologie herstellbare Pumpengeometrie liegt die Elementanzahl im Bereich $n_A < 10$. Damit ergibt sich das Verhältnis der Flächen zu:

$$\left. \frac{A_z}{A_l} \right|_{n_A=10} \approx 1,6 \quad (6.27)$$

Entsprechend der kleineren Elementflächen der axialen Anordnung sinkt auch die theoretisch mögliche Volumenförderung auf

$$q_{v, \text{theo}} \approx 88 \mu\text{l/s} \quad (6.28)$$

Die für die radiale Anordnung angegebene maximale Druckdifferenz bleibt weiterhin gültig.

6.3 Simulation der axialen Kammerpumpe

Trotz der besseren Flächenausnutzung der radialen Anordnung, sprechen technologische Gründe gegen diese Variante. Für erste Untersuchungen der Fluidförderung mittels dielektrischer Elastomeraktoren ist es erstrebenswert die Struktur so einfach wie möglich zu halten, um Fehlerquellen schnell erkennen und entfernen zu können. Der gekrümmte Kanal der radialen Anordnung ist für Überprüfungen der Durchlässigkeit kaum zugänglich.

Aufgrund der einfacheren Geometrie der axialen Anordnung ist diese daher Gegenstand der folgenden Betrachtungen bezüglich des mechanischen Verhaltens und der fluiddynamischen Leistungsfähigkeit sowie der nachfolgenden Realisation.

Die sich bewegenden Wände der peristaltischen Pumpe erhöhen den Druck im Fluid und infolgedessen strömt das Fluid in Richtung des Pumpenauslasses. Im Gegensatz zu vielen anderen Pumpen ist die hier entwickelte Pumpe aus einem sehr weichen Material aufgebaut. Eine Wechselwirkung zwischen Fluid und dem Pumpenkörper ist daher nicht auszuschließen. Die Bestimmung der Leistungsfähigkeit der peristaltischen Pumpe kann daher streng genommen nur durch eine gekoppelte Simulation des mechanischen Verhaltens und der fluiddynamischen Vorgänge erfolgen. Die Simulation eines gekoppelten mechanisch-fluidischen Systems ist aber derart rechenintensiv, dass der enorme Zeitaufwand für eine frühe Konzeptionsphase nicht gerechtfertigt erscheint.

Die im folgenden dargestellten Simulationsergebnisse des mechanischen Verhaltens und später des peristaltischen Fluidsystems entstammen daher einer Reihe iterativ durchgeführter Simulationen. In mehreren Schritten wurden die Parameter des Fluidsystems an die Ergebnisse aus der mechanischen Simulation angeglichen, die selbst wiederum Ergebnisse wie entstehende Druckverteilungen berücksichtigt hatte. Die Simulationen des mechanischen Verhaltens werden mit der Finite-Element-Software ANSYS durchgeführt, die Simulation des Fluidsystems mit der CFD-Software FLUENT v6.2.

6.3.1 Simulation des mechanischen Verhaltens

Bei der Modellierung und Übertragung eines Körpers in finite Elemente muss ein Elementtyp gewählt werden, der das Material des Körpers gut genug für die jeweilige Situation abbilden kann. Je mehr Freiheitsgrade der Elementtyp besitzt, desto realistischer kann prinzipiell das Materialverhalten in ANSYS untersucht werden. Je mehr Freiheitsgrade vorhanden sind, desto mehr Materialparameter müssen aber auch von dem jeweiligen Material bekannt sein, da ansonsten die Simulationsergebnisse stark von der Realität abweichen bis falsch sein können.

Elastomere zeigen bis zu sehr großen Dehnungen ein elastisches Verhalten. Solange die Dehnungen verhältnismäßig klein bleiben, zeigen die Elastomere wie viele andere Werkstoffe ein lineares Verhalten. In diesem Fall kann die Kennlinie des Spannungs-Dehnungs-Diagramms durch eine Gerade ersetzt werden. Deren Steigung allein durch das E-Modul E beschrieben wird.

Bei größeren Dehnungen $S > 20\%$ ist eine Gerade nicht mehr in der Lage den Zusammenhang zwischen der Dehnung S des Materials und den inneren Spannungen T mit einer ausreichenden Genauigkeit zu beschreiben. In diesem Fall muss das Materialverhalten mit Hilfe eines hyperelastischen Materialmodells beschrieben werden, wie es z.B. in der allgemeinsten Form von OGDEN formuliert wurde [Ogd97].

Die in Abschnitt 3.1.1 gezeigten Spannungs-Dehnungskurven des verwendeten Dielektrikums zeigen, dass die lineare Modellierung der hier betrachteten Pumpengeometrie bis zu einer Dehnung $S < 15\%$ noch möglich ist.

Ziele der Simulation des mechanischen Verhaltens

Über die folgenden Punkte sollen die Simulationen des mechanischen Verhaltens Aufschluss geben:

- **Form des Kanalquerschnittes:** Die fluiddynamischen Simulationen gehen von einer in y -Richtung gleichmäßigen Kanalhöhe und einer in z -Richtung konstanten Breite aus. Die Simulationen sollen zeigen, wie realistisch diese Annahme ist.
- **Aufweitung des Pumpenkanals:** Die peristaltische Bewegung der Kanalwand hat einen hydrodynamischen Effekt auf das Fluid, es wird Energie auf das Fluid übertragen, was unter anderem zu einem Druckanstieg in dem Fluid führt. Dieser interne Druck des Fluids wirkt seinerseits wieder zurück auf den Pumpenkörper. Da der gesamte Körper aus einem relativ weichen Material besteht, sind die Auswirkungen dieser Druckrückwirkung zu untersuchen.
- **Anzahl der Aktorelemente:** Prinzipiell müssen innerhalb des Pumpenkanals mehr als zwei Aktorelemente platziert werden, damit eine peristaltische Welle Energie auf das Fluid übertragen kann. Vom Herstellungsprozess ist die minimale Länge in axialer Richtung auf etwas mehr als einen Millimeter beschränkt. Bei einer Gesamtlänge des Pumpenkanals entspräche dies bis zu 30 Aktorelementen. Um den Aufwand für die Kontaktierung in einem für einen Prototypen angemessenen Rahmen zu halten, sollten nicht mehr als 4 Aktoren unabhängig voneinander anzusteuern sein.

6.3.1.1 Form des Kanalquerschnittes

Für die durchgeführten fluiddynamischen Simulationen wird der Pumpenkanal als zweidimensionales Objekt modelliert mit den x -Achse in Längsrichtung der Pumpe und der z -Achse parallel zur Dicke des Silikonkörpers, siehe Abbildung 6.11.

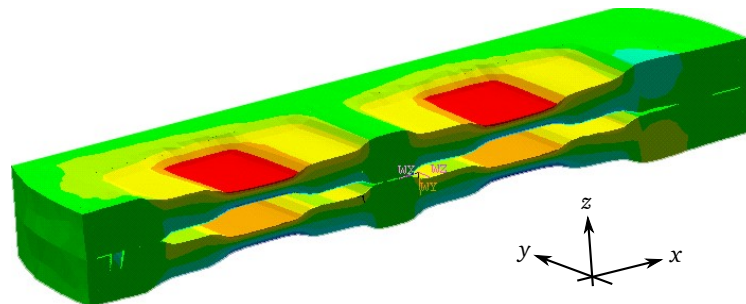


Abbildung 6.11: Ausrichtung des Koordinatensystem in der Simulation der Kammerpumpe.

Abbildung 6.12 zeigt den Querschnitt des Pumpenkanals entlang der y -Achse für drei Zeitpunkte t_i während einer Periode an einer Stelle x_0 . Beachtet man die extrem unterschiedlichen Skalierungen der Abszisse und Ordinate, so ist die Annahme vertretbar, dass der Pumpenkanal zu allen Zeiten an diesem Ort eine konstante Breite entlang der z -Achse besitzt und der Querschnitt somit für alle Zeiten t als rechteckig angenommen werden kann.

6.3.1.2 Aufweitung des Pumpenkanals

Die Interaktion zwischen Pumpenwand und Fluid führt zu einer Druckerhöhung in der Flüssigkeit. Da der Pumpenkörper durch die Verwendung von weichem Silikon sehr elastisch ist, wird der im Fluid aufgebaute Druck die Öffnung des Pumpenkanals g vergrößern. Abbildung 6.13 zeigt

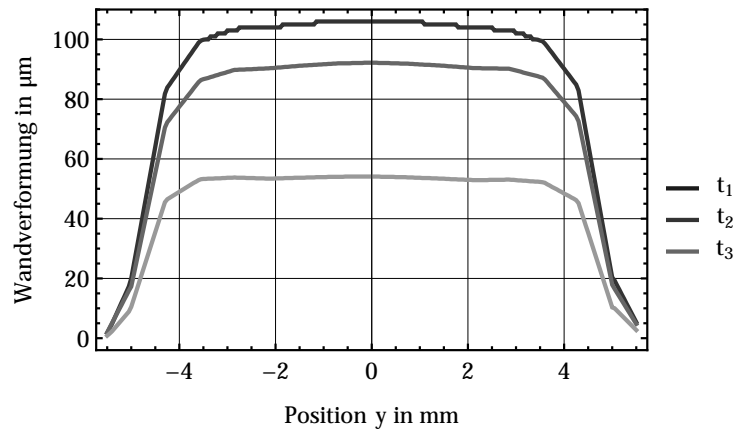


Abbildung 6.12: Kontur des Kanalquerschnitts zu drei Zeitpunkten innerhalb einer Periode.

für zwei exemplarische Drücke, wie weit sich die Kanalwand hebt. Aus dem Diagramm lässt sich ablesen, dass die Kanalaufweitung in Abhängigkeit des Drucks

$$g(p_{\text{fluid}}) = 0,2 \frac{\mu\text{m}}{\text{Pa}} \quad (6.29)$$

beträgt.

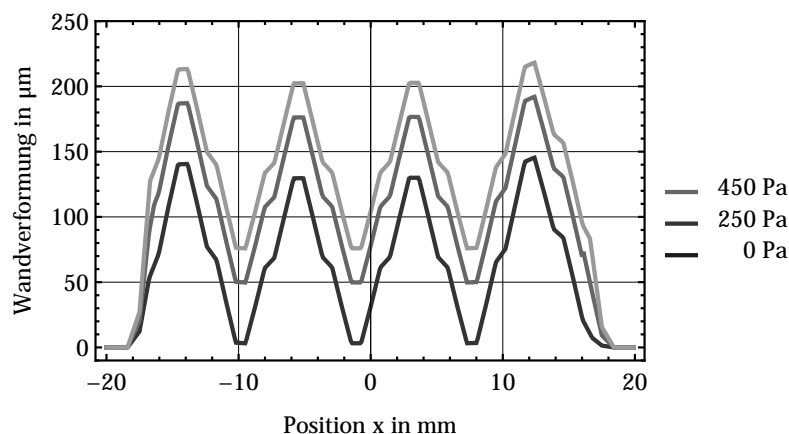


Abbildung 6.13: Simulationsergebnis für die Aufweitung des Pumpenkanals durch den aufgebauten Druck des Fluids. Dargestellt ist eine Pumpenwand.

6.3.1.3 Anzahl der Aktorelemente

Eine wichtige Frage ist, wie viele Aktorelemente innerhalb des Pumpenkanals zu realisieren sind. Es müssen mehr als zwei Elemente pro Wellenlänge sein, da sich sonst nur eine stehende Welle ausbildet. Zu viele Elemente wiederum lassen den Aufwand der Kontaktierung ansteigen. Weiterhin steigt der Ausschuss im Herstellungsprozess überproportional mit der Anzahl der Aktorelemente an.

Für die Diagrammkurven wurden die Kontaktdrücke p_k zwischen der oberen und der unteren Pumpenkanalwand ermittelt. Die aus der Simulation erhaltenen Werte wurden dann über die Gesamtlänge der Pumpe L gemittelt. Im Diagramm 6.14 ist nun der zeitliche Verlauf dieser gemittelten Werte während einer Periodendauer aufgetragen. Da es hier vor allem um den qualitativen Unterschied geht, sind die Werte auf den aufgetretenen Maximalwert normiert.

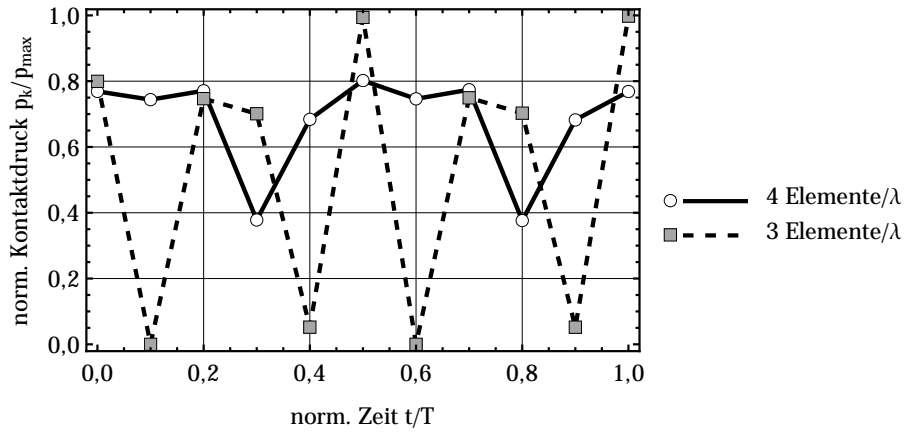


Abbildung 6.14: Zeitlicher Verlauf des normierten Schließdrucks zwischen Ober- und Unterseite des Kanals.

Die dunkle Kurve in Abbildung 6.14 zeigt, dass es in einer Pumpe mit drei Aktorelementen je Wellenlänge Zeitpunkte gibt, an denen der Kontaktdruck p_k verschwindet. Da der gemittelte Druck nur dann zu Null werden kann, wenn die beiden Wände sich an keiner Stelle des Kanals berühren, bedeutet dies, dass zu diesen Zeitpunkten eine direkte Verbindung von Einlass und Auslass besteht.

Betrachtet man dagegen die hellere Kurve, so ist zu erkennen, dass es bei einer Pumpe mit vier Aktorelementen die gemittelten Kontaktkräfte während einer Pumpenperiode niemals verschwinden. Entsprechend des ersten Falls bedeutet dies, dass zu keinem Zeitpunkt eine direkte Verbindung zwischen Einlass und Auslass der Pumpe besteht.

Abbildung 6.14 zeigt damit deutlich, dass durch die Inkaufnahme des höheren Kontaktierungsaufwandes und der höheren Ausschusswahrscheinlichkeit von einer höheren Pumpleistung ausgegangen werden kann. Auch wenn damit zu rechnen ist, dass sich die Wände aufgrund der Druckerhöhung im Fluid aufweiten, werden die ersten Prototypen mit vier Aktorelementen je Wellenlänge ausgestattet sein.

6.3.2 Simulation der fluiddynamischen Leistungsfähigkeit

Die Ergebnisse in Abschnitt 6.3.1.1 haben gezeigt, dass die Höhe des Pumpenkanals in der y-Richtung quer zur Flussrichtung als konstant angenommen werden kann. In der fluiddynamischen Simulation wird die Kammerpumpe analog zu 6.2.1 ebenfalls als zweidimensionale Struktur mit einer definierten Tiefe abgebildet. Die Simulation wird stationär durchgeführt, die Druckdifferenzen Δp zwischen Einlass und Auslass werden als Randbedingungen vorgegeben.

Abbildung 6.15 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation: Ist der Auslass der Pumpe mit $\Delta p = 0$ ideal offen, so sagt die Simulation einen maximalen Volumenfluss

$$q_{v, \max} = 1,6 \frac{\mu l}{s} \quad (6.30)$$

voraus. Der maximale Gegendruck Δp_{\max} am Auslass bei dem q_v gerade zu Null wird liegt bei

$$\Delta p_{\max, \lambda} = 2000 \frac{\text{Pa}}{\lambda} \quad (6.31)$$

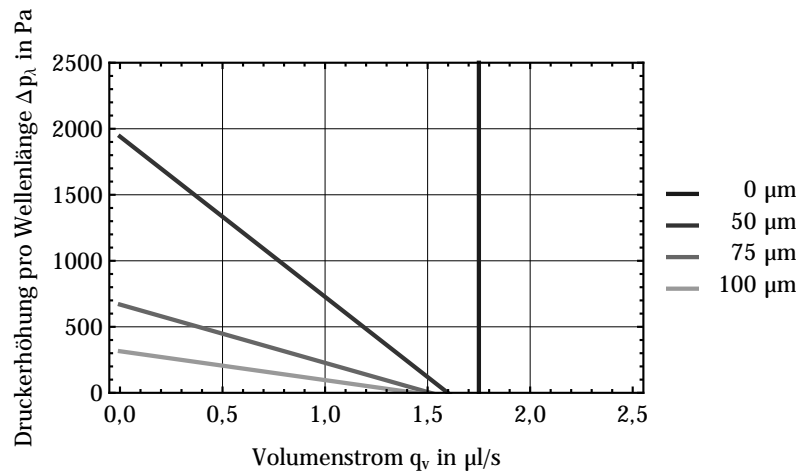


Abbildung 6.15: Kennlinien der axialen Kammerpumpe für vier verschiedene Spaltbreiten g .

Da bei der betrachteten Geometrie von zwei peristaltischen Wellenlängen innerhalb des Pumpenkanals ausgegangen wird, sollte

$$\Delta p_{\max} = 4 \text{ kPa} \quad (6.32)$$

gelten.

Im Gegensatz zur Schlauchpumpe lässt die Kammerpumpe also eine vertretbare Fluidförderleistung erwarten. Die technologische Realisierbarkeit ist für die axiale Anordnung einfacher gegeben, als in der radialen Anordnung. Tabelle 6.3 stellt noch einmal zusammenfassend die durch die Simulation erarbeiteten Geometrieparameter der axialen Kammerpumpe zusammen. Diese Parameter gelten als Ausgangsgröße für die Realisierung der Pumpe, die in Kapitel 7 dargestellt wird.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Gestaltungsparameter der axialen Kammerpumpe

Parameter	Einheit	Wert
Anzahl Aktorelemente n	1	8
Länge Aktorelement l	mm	4
Breite Aktorelement B	mm	10
Amplitude b	μm	100
Wellenlänge λ	mm	15
Frequenz f	Hz	10

7 Peristaltische Pumpe aus Elastomerstapelaktoren

7.1 Geometrie

Die peristaltische Pumpe hat eine Struktur, wie sie in Kapitel 6.2.2 beschrieben und in Abbildung 7.1 skizziert ist. Die aktive Pumpenstruktur ist als aktiver Kanal längs des Durchmessers des Substrates in das Silikon integriert. Aktivierte Elastomeraktoren stauchen das Material oberhalb und unterhalb des Kanals und es bilden sich Hohlräume, die sich aufgrund der phasenverschobenen Ansteuerung der Aktorelemente durch die Pumpe hindurch bewegen.

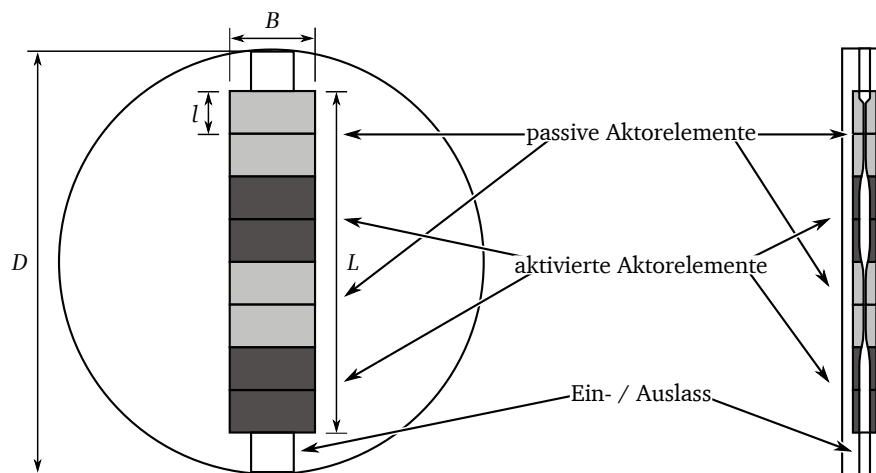


Abbildung 7.1: Prinzipskizze der peristaltischen Pumpe.

Der Durchmesser des Substrates beträgt $D = 40$ mm. Auf jeder Seite des Kanals werden 4 mm für die Kontaktierung von Anschlusschläuchen benötigt. Somit verbleibt für den eigentlichen peristaltischen Kanal eine Länge $L = 32$ mm

Für die Simulation der Pumpe in Abschnitt 6.3.1 wird von einer Aufweitung des Kanals von $100\text{ }\mu\text{m}$ ausgegangen. Um diese Auslenkung auch bei nicht idealer Kontaktierung der Einzelschichten erreichen zu können, wird eine Stapeldeformation von 7 % angenommen. Hieraus resultiert eine Wandstärke von 1,5 mm.

Desweiteren haben die Simulationen gezeigt, dass kleinere Aktorelemente zugunsten einer höheren Aktoranzahl eine bessere Pumpleistung erwarten lassen. Daher werden acht Aktorelemente auf jede Seite des Pumpkanals integriert. Aufgrund der Herstellung der Elektroden ist es notwendig, dass ein kleiner Abstand die Aktorelemente voneinander isoliert. Daher verbleibt eine Länge $l = 3$ mm für jedes Aktorelement. Die Breite ist aufgrund des notwendigen Platzes für die Kontaktierung auf $B = 10$ mm beschränkt. Mit diesen charakteristischen Größen der peristaltischen Pumpe kann der Schichtaufbau der Pumpe wie in Abbildung 7.2 dargestellt werden. Im links dargestellten Längsschnitt sind die diskreten Aktorelemente mit einem Isolationsabstand gezeigt. Im rechts dargestellten Frontalschnitt, sind die Zuleitungen der Elektroden zu erkennen, die jeweils abwechselnd zu einer Seite geführt werden.

Über die bisherige Darstellung hinausgehend, sind fünf weitere Schichten in Abbildung 7.2 zu erkennen. Nach außen werden die Aktorelemente durch eine dicke Deckschicht auf der Unter- sowie

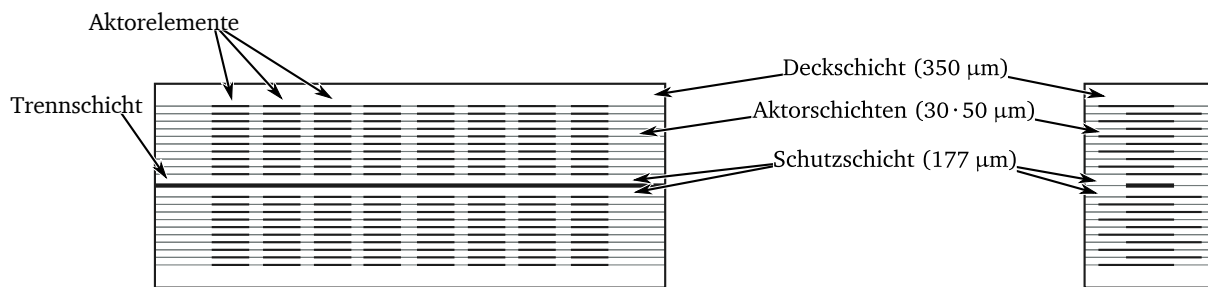


Abbildung 7.2: Prinzipielle Darstellung des Schichtaufbaus der peristaltischen Pumpe.

der Oberseite der Pumpe gekapselt. Nach innen, zum Kanal hin trennt die Aktorelemente eine Kanalschicht, die ebenfalls deutlich dicker als die eigentlichen Aktorschichten ausgeführt ist. Das Dickenverhältnis dieser beiden Schutzschichten ist so ausgelegt, dass die eigentlich symmetrische Dickenänderung der Aktorelemente in Richtung Kanal gelenkt wird.

Der durchgehende Strömungskanal wird während der Herstellung durch eine durchgehende Graphitschicht präpariert. Diese dicke Partikelschicht verhindert eine Anhaftung der beiden anliegenden Silikonoberflächen. Daher kann der Kanal nach der Herstellung sehr leicht geöffnet werden.

Der gesamte Geometrieparametersatz ist in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Übersicht über die Geometrieparameter der peristaltischen Pumpe

Parameter	Einheit	Wert
Gesamtdurchmesser D	mm	40
Kanallänge L	mm	32
Anzahl Aktorelemente N	1	8
Länge Aktorelement l	mm	3
Breite Aktorelement B	mm	10
Schichtanzahl n	1	30
Schichtdicke d	µm	50
Dicke Deckschicht d_{Decke}	µm	350
Dicke Kanalschicht d_{Kanal}	µm	177

7.2 Herstellung

Direkt nach der automatisierten Herstellung des Pumpenkörpers liegt eine Silikonscheibe mit integrierten Aktorelementen vor, siehe Abbildung 7.3(a). Dieser Körper wird in einem durchgehenden Prozess vollautomatisch hergestellt. Nach Abtrennen des überflüssigen Silikonmaterials werden die Aktorelemente kontaktiert. Auf einer Seite der Pumpe können die Aktoren alle mit einem gemeinsamen Massepotenzial verbunden werden, siehe Abbildung 7.3(b). Der letzte Schritt ist der fluidische Anschluss. Hierzu stellen PVC-Adapter die Verbindung zwischen rechteckigem Pumpenkanal und Silikonschläuchen mit 4 mm Durchmesser her, siehe Abbildung 7.3(c).

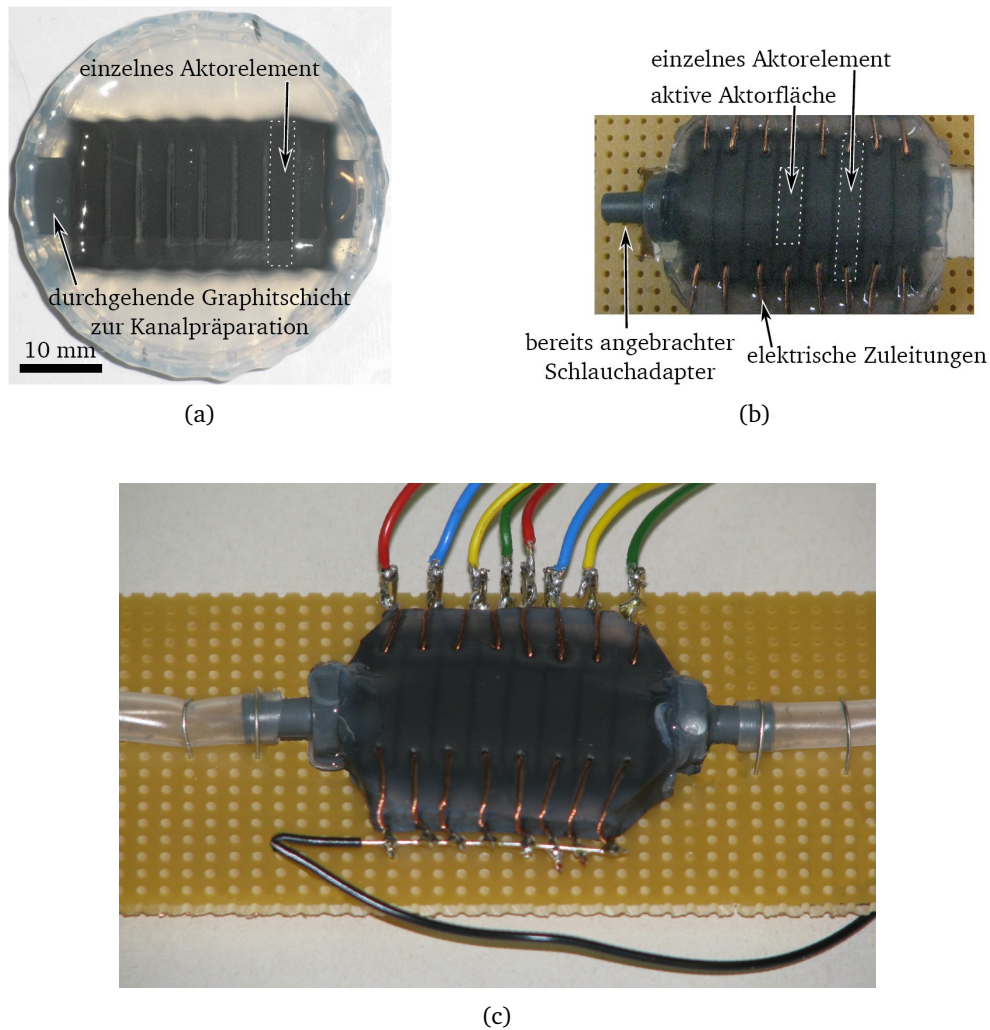


Abbildung 7.3: Schritte der Pumpenherstellung. (a) Silikonkörper mit integrierten Aktorelementen; (b) kontaktierte Aktorelemente; (c) aufgebaute peristaltische Pumpe mit Schlauchanschlüssen.

7.3 Ansteuerung

Die acht Aktorelemente der peristaltischen Pumpe stehen zur Ausbildung von zwei peristaltischen Wellen zur Verfügung. Daher können zwei Elemente, jeweils eines der ersten und eines der zweiten Welle, simultan angesteuert werden. Wie Abbildung 7.4 zeigt, wird die Hochspannung für die Aktoren mit Hilfe von Spannungskonvertern (2A12-P4STD, Ultravolt Inc.) erzeugt. Die eigentlichen Signalverläufe werden mit Hilfe einer IO-Karte im Messrechner generiert.

Die Signalverläufe können in Form von Sinus- oder Rechteckschwingungen erzeugt werden. Wie in Abbildung 7.5(a) dargestellt ist, sind Amplitude U_0 , Frequenz f sowie die Phasenverschiebung φ die einstellbaren Parameter der sinusförmigen Ansteuerspannung. Die Spannungen sind unipolare Signale mit einer maximalen Spitzenspannung von 2000 V. Die Frequenz kann von quasistatisch bis ca. 30 Hz eingestellt werden, die Signalform wird allerdings ab Frequenzen von 10 Hz immer mehr verzerrt. Die Phasenverschiebung φ ist zwischen jeweils zwei benachbarten der vier Kanäle gleich und kann zwischen $\pm 90^\circ$ variiert werden.

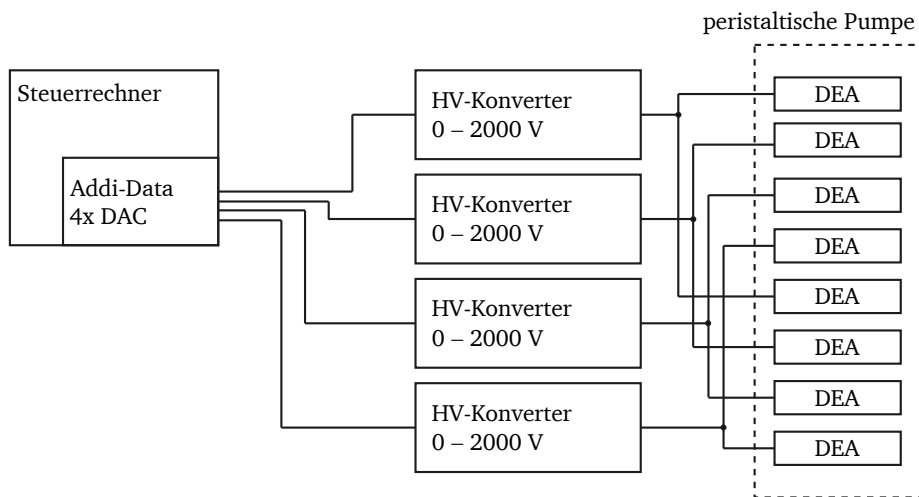


Abbildung 7.4: Schematische Darstellung der 4-Kanal-Ansteuerung der peristaltischen Pumpe.

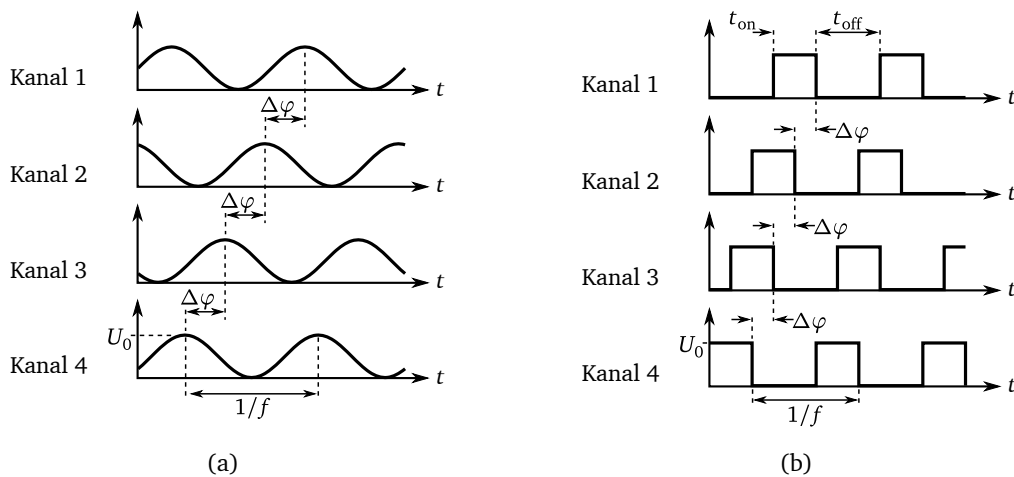


Abbildung 7.5: Parameter der Betriebsspannungen für die peristaltische Pumpe.

Zusätzlich zu den Parametern der sinusförmigen Betriebsspannung kann für die Rechtecksignale das Pulsbreitenverhältnis $\delta = t_{\text{on}}/T$ eingestellt werden, siehe Abbildung 7.5(b). Für die Untersuchung geeigneter Ansteuerungsmuster bietet die Rechteckschwingung damit ein größeres Spektrum an Variationsmöglichkeiten. Bei den später gezeigten Ergebnissen der peristaltischen Pumpe beträgt bei jedem Rechtecksignalbetrieb das Pulsbreitenverhältnis 0,5.

7.4 Charakterisierung der Pumpe

Zur Charakterisierung der peristaltischen Pumpe wird zunächst das elektromechanische Verhalten in Form der Aktorauslenkung betrachtet. Im zweiten Teil dieses Abschnittes wird die Leistungsfähigkeit der Pumpe anhand der Förderung von deionisiertem Wasser untersucht.

7.4.1 Elektromechanisches Verhalten

Durch die oben beschriebene nahtlose Herstellung des Pumpenkörpers können Pumpenaktoren vor der Verwendung als peristaltische Pumpe nicht elektromechanisch charakterisiert werden. Die durch den Kanal getrennten oberen und unteren Aktorschichten können nur irreversibel voneinander getrennt werden. Daher werden Aktorcharakterisierungen und Durchflussmessungen an verschiedenen Objekten durchgeführt. Da die Herstellung mit gleichbleibender Qualität erfolgt, sind Messergebnisse an einer Aktorschicht auf die Aktoren eines Pumpenkörpers übertragbar, sofern die individuelle Kontaktierungsqualität der Einzelschichten berücksichtigt wird.

Frequenzgang der Auslenkung

Abbildung 7.6 zeigt den Frequenzgang einer typischen Aktorauslenkung. Es ist wieder der bereits in Abschnitt 5.2.2 diskutierte leichte Abfall um 50 % der maximalen Auslenkung über mehr als drei Dekaden zu sehen. Obwohl das Modell auf der Messung der mechanischen Impedanz für Frequenzen oberhalb 10 Hz beruht, kann der Verlauf auch bis zu den niedrigen Frequenzen von 0,1 Hz qualitativ gut erklärt werden.

Die Auslenkung sinkt langsamer als die Frequenz ansteigt. Für die peristaltische Pumpe bedeutet dies, dass der Volumenstrom mit wachsender Frequenz ansteigt, obwohl das Kammervolumen bei höheren Frequenzen kleiner wird. Für den Pumpenbetrieb wiegt jedoch schwerer, dass die dynamischen Auslenkungen selbst bei sehr kleinen Frequenzen noch deutlich unter der statischen Auslenkung liegen.

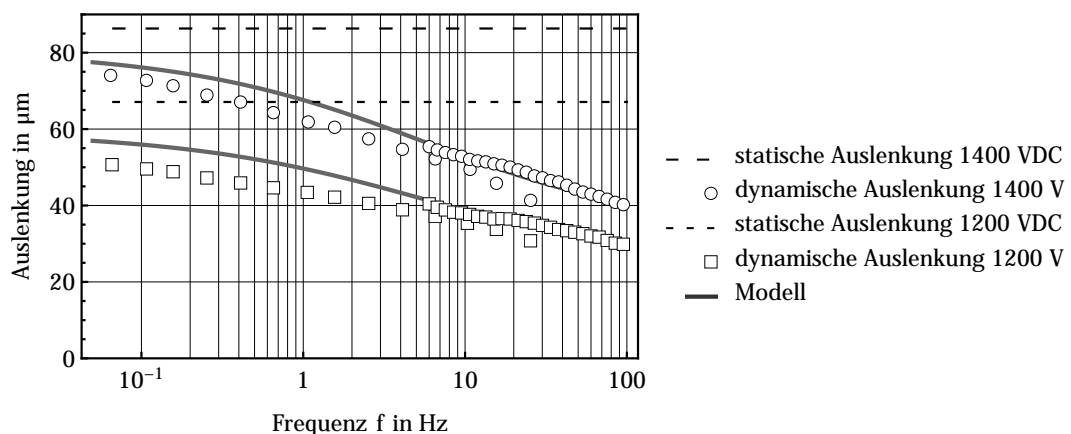


Abbildung 7.6: Typischer Auslenkungsfrequenzgang eines Pumpenaktors.

Die Messwerte für diesen Frequenzgang wurden bei zwei unterschiedlichen Ansteuerungen vorgenommen. Für den niederfrequenten Bereich bis 30 Hz werden die Aktoren unipolar angesteuert. Als Spannungsquellen werden die Hochspannungskonverter der Pumpenansteuerung aus dem vorangegangenen Abschnitt benutzt. Für den höherfrequenten Bereich wird ab einer Frequenz

von 3 Hz ein bipolarer Hochspannungsverstärker benutzt. Die zunehmende Abweichung der Messwerte im Überlappungsbereich ist damit zu erklären, dass die Hochspannungskonverter die Sinuskurvenform oberhalb 10 Hz mehr und mehr verzerren. Die Werte sind über der Frequenz der mechanischen Bewegung dargestellt, die Frequenzverdoppelung bei bipolarer Ansteuerung ist entsprechend berücksichtigt.

Kanalseitige Auslenkung

Die in Abschnitt 7.1 beschriebene Integration von Schutzschichten soll die Aktorelemente vor dem Fluid sowie der mechanischen Belastung während der einmaligen Kanalöffnung direkt nach Herstellung schützen. Damit die Auslenkung der Aktoren nicht asymmetrisch in Richtung Außenseite gelenkt wird, umgeben Schutzschichten den Pumpenkörper. Abbildung 7.7 zeigt, dass die Auslenkungsumlenkung von der Außenseite auf die Innenseite der Pumpe mit Hilfe der Deck- und Schutzschichten gelingt. Die Bewegung der Kanaloberfläche ist dadurch etwa dreimal so groß wie die Auslenkung an der Pumpenaußenseite.

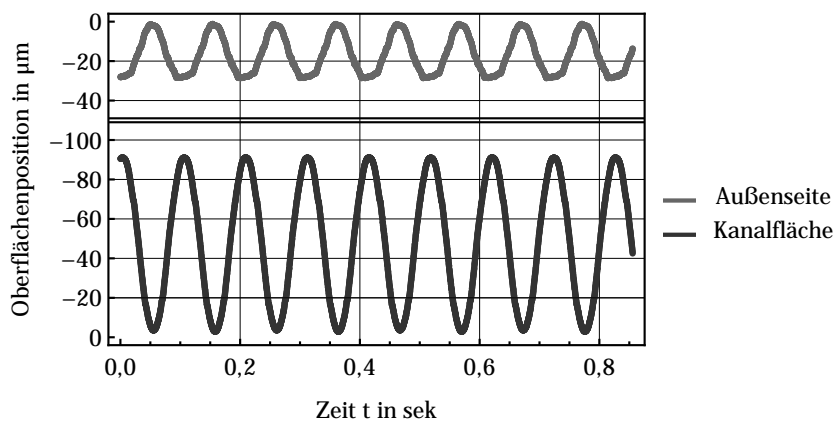


Abbildung 7.7: Auslenkung einer Pumpenaktorenschicht an der Außen- und innenliegenden Kanalfläche.

Einfluss der unipolaren Ansteuerung

Aufgrund der verhältnismäßig günstigen Lösung durch einzelne Hochspannungskonverter werden die Pumpenaktoren mit einer unipolaren Hochspannung betrieben. Aus der Mikrosystemtechnik ist bekannt, dass unipolare Ansteuerspannungen eine Elektretbildung fördern [IG08]. Von der Elektrode auf das Dielektrikum wandernde Ladungen verursachen ein remanentes elektrisches Feld, das die Ruheauslenkung zunehmend verkleinert.

Abbildung 7.8 zeigt die relative Abweichung der Auslenkung eines Aktorelementes innerhalb mehrerer Stunden bei unipolarer und bipolarer Ansteuerung mit 3 Hz und einer Feldstärke von 25 V/µm. Die Schwankungen der Auslenkung bei bipolarer Ansteuerung sind mit keinem Aufladungsphänomen erklärbar. Die plötzliche Zunahme der Auslenkung nach einer halben Stunde sowie die ebenso plötzliche aber reversible Abnahme nach 1,5 h sind eher auf eine zeitlich variable Kontaktierung zusätzlicher Elektrodenschichten zurückzuführen. Der Verlauf der Auslenkungsänderung bei unipolarer Ansteuerung spricht ebenso gegen eine Elektretbildung, die vielmehr eine kontinuierliche Verringerung der Auslenkung erwarten lassen würde. Die Änderungen werden auch hier mit einer unterschiedlichen Anzahl kontaktierter Schichten während des Aktorbetriebes zusammenhängen.

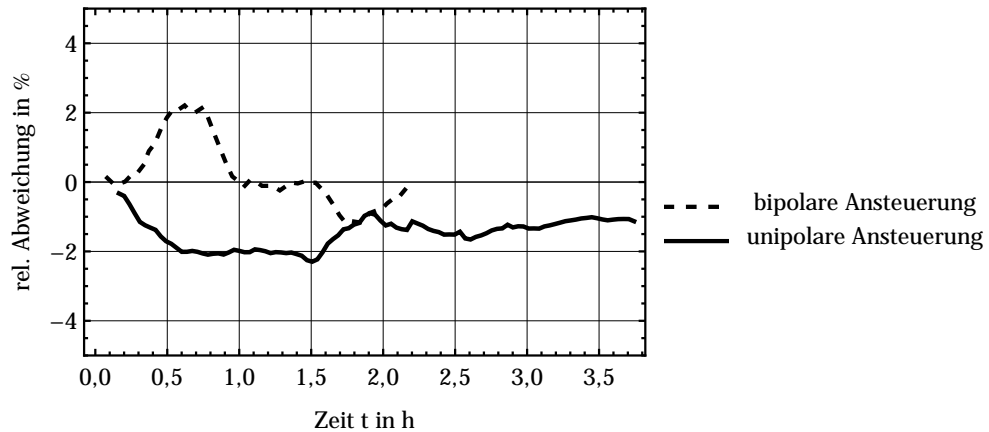


Abbildung 7.8: Zeitliche Änderung der Aktorauslenkung bei bipolarer und unipolarer Ansteuerung. Dargestellt ist die Differenz der momentanen Auslenkung vom Mittelwert der ersten fünf Messwerte, normiert auf diesen Mittelwert.

7.4.2 Fluidische Charakterisierung

Um die Leistungsfähigkeit der Pumpe zu untersuchen, wird die peristaltische Pumpe in einem Messstand betrieben, wie er in Abbildung 7.9 dargestellt ist. Der Einlass der Pumpe ist mit einem waagrechten Schlauch verbunden, in den das Fluid ohne Höhenunterschied ein- und ausströmen kann. Vom Auslass der Pumpe strömt das geförderte Fluid in einen Schlauch, der im weiteren Verlauf senkrecht nach oben verläuft. Hierdurch ist es möglich, eine Kennlinie aufzunehmen, die das Verhältnis von Volumenstrom q_v zu Druckerhöhung Δp der peristaltischen Pumpe aufzeigt. Dazu wird die Bewegung der Fluid-Luft-Grenzfläche kontinuierlich in beiden Schläuchen mit Hilfe von Kameras aufgenommen. Der Volumenstrom q_v kann dann aus der Weg- und Zeitdifferenz Δx bzw. Δt und dem Schlauchdurchmesser D_{Schlauch} einfach berechnet werden:

$$q_v = \frac{\pi D_{\text{Schlauch}}^2}{4} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (7.1)$$

Die Druckerhöhung entspricht dem momentanen hydrostatischen Druck am Pumpenauslass durch die aufgestaute Flüssigkeitssäule im senkrechten Schlauch. Die Druckerhöhung Δp kann daher aus

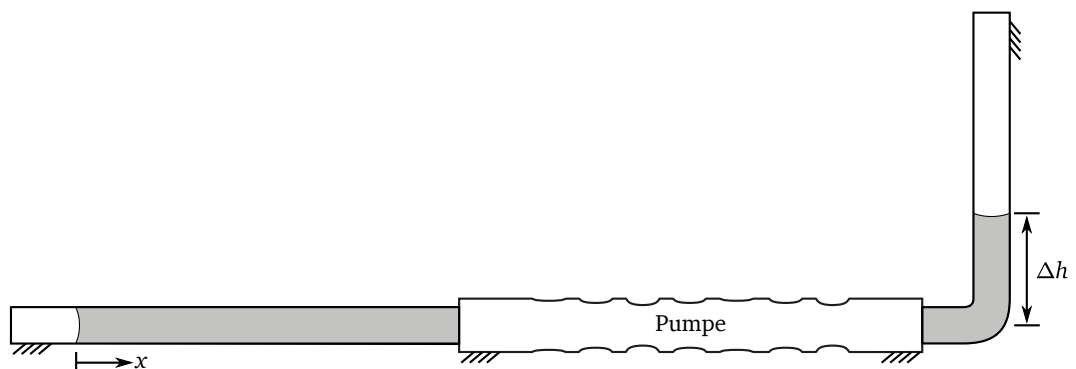


Abbildung 7.9: Messplatz zur Ermittlung der Pumpenkennlinien.

der Höhendifferenz Δh zwischen Fluid-Luft-Grenzfläche und Pumpenachse sowie der Dichte des Fluids errechnet werden:

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot g \quad \text{mit Erdbeschleunigung } g \quad (7.2)$$

Mit der Aufnahme der Flüssigkeits-Luft-Grenzflächen in beiden Schläuchen ist es möglich, auch Fehler während der Messung zu dokumentieren. Eine Leckage der peristaltischen Pumpe würde sich beispielsweise in unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten in beiden Schläuchen zeigen. Bilder der beiden Kameras werden in einem Abstand von 10 s gespeichert und nachträglich mit Hilfe der Software *ImageJ* ausgewertet. Aufgrund der Auflösung der aufgenommenen Bilder und dem zeitlichen Abstand der Aufnahmen ist es möglich, die maximale Druckerhöhung einer Genauigkeit von ca. 7 % und den Volumenstrom mit einer Genauigkeit von ca. 8 % zu bestimmen.

Bei allen folgenden Messergebnissen stellt deionisiertes Wasser das geförderte Fluid dar. Damit das deionisierte Wasser durch den Silikon-Pumpenkörper sowie die Silikonschläuche transportiert wird, muss ein Tensid zur Herabsetzung der Oberflächenspannung hinzugegeben werden.

Abbildung 7.10 zeigt die Kennlinien der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomerstapelaktoren. In diesem Diagramm sind die Messergebnisse für verschiedene Pumpenkörper und unterschiedlichen Betriebsfrequenzen zusammengefasst. Zur besseren Einschätzung der Leistungsfähigkeit sei folgende Umrechnung genannt:

$$1 \text{ kPa} \approx 1 \text{ dmH}_2\text{O}$$

Es ist zu erkennen, dass mit der peristaltischen Pumpe Volumenströme von über 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ sowie eine Druckerhöhung von knapp 0,4 kPa erreicht werden können. Die Kennlinien in Abbildung 7.10 erlauben einige grundlegende Aussagen über die Charakteristik der peristaltischen Pumpe. Es fällt auf, dass die Kennlinien ausgehend von den Leerlauf-Volumenströmen zunächst senkrecht nach oben verlaufen. Bis zu einem Gegendruck von etwa 0,15 kPa ist der geförderte Volumenstrom praktisch unabhängig vom Gegendruck am Pumpenauslass. Die peristaltische Pumpe verhält sich in diesem Bereich also tatsächlich wie eine klassische Verdrängerpumpe.

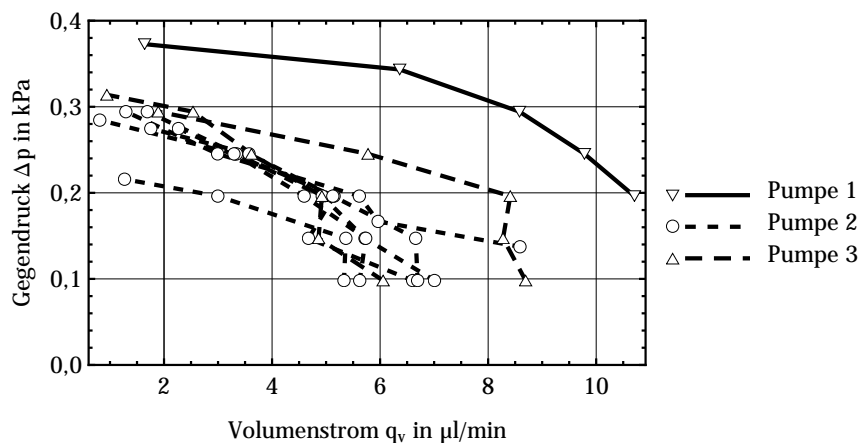


Abbildung 7.10: Kennliniendiagramm der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomerstapelaktoren. Gezeigt sind die Kennlinien mehrerer Pumpenexemplare bei unterschiedlichen Frequenzen und Ansteuersignalen.

Höhere Gegendrucke über 0,15 kPa verursachen eine Aufweitung des Pumpenkörpers. Es kommt zu einem Leckagestrom, der den Netto-Volumenstrom herabsetzt. Die Folge ist ein starker Abfall des Volumenstroms bei steigendem Gegendruck, wie es qualitativ auch die Simulationen in Abschnitt 6.2.2 vorhergesagt haben.

Wie in Abschnitt 7.3 erläutert, können die Pumpenaktoren mit unterschiedlichen Signalverläufen angesteuert werden. Abbildung 7.11 zeigt Kennlinien für die Ansteuerung mit sinusförmigem Hochspannungsverlauf. Im untersuchten Frequenzbereich zwischen 10 Hz und 20 Hz kann keine Aussage über eine Frequenzabhängigkeit der Kenndaten Volumenstrom und maximalem Gegendruck getroffen werden.

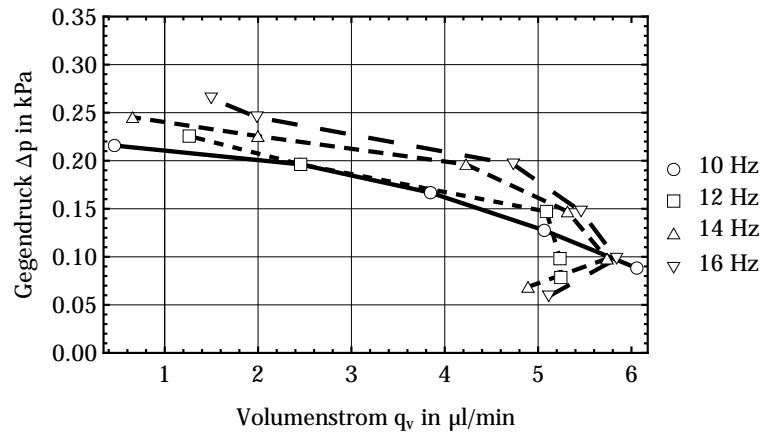


Abbildung 7.11: Sinusförmige Ansteuerung: Ausgewählte Kennlinien der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomerstapelaktoren.

Die maximalen Volumenströme sind bei minimalen Gegendrücken zu messen. Wie oben bereits erwähnt, verhält sich die peristaltische Pumpe in diesem Betriebsbereich wie eine Verdrängerpumpe. Da sich das maximale Kammervolumen durch die Ansteuerung nicht verändert, ist keine Abhängigkeit des maximalen Volumenstroms von der Signalform zu erwarten. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse unterstützt, die in Abbildung 7.12 gezeigt sind. Dieses Diagramm zeigt die Kennlinien für eine Ansteuerung mit symmetrischen Rechtecksignalen. Die maximalen Volumenströme liegen im Bereich zwischen 5 $\mu\text{l/min}$ und 6 $\mu\text{l/min}$ und entsprechen damit den Ergebnissen der sinusoidalen Anregung.

Im Gegensatz dazu zeigt sich ein deutlicher Unterschied im maximalen Gegendruck, gegen die die peristaltische Pumpe arbeiten kann. Mit der sinusoidalen Anregung sind durchschnittlich 0,24 kPa zu erreichen. Werden die Aktoren mit Rechtecksignalen angesteuert, kann die Pumpe bis zu einem Gegendruck von durchschnittlich 0,28 kPa Flüssigkeit fördern.

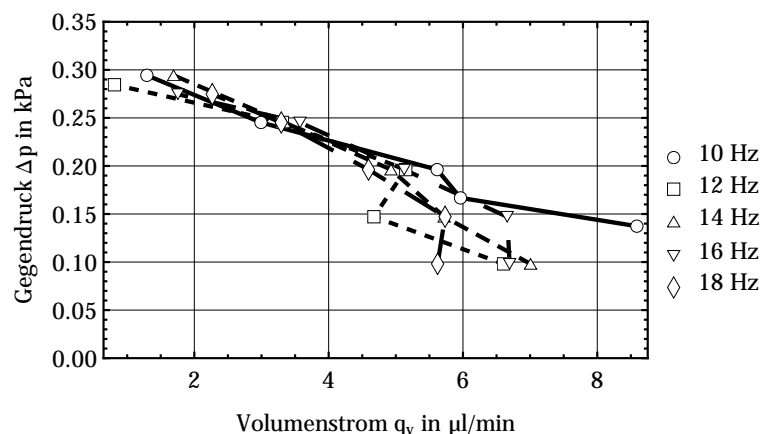


Abbildung 7.12: Rechteck-Ansteuerung: Ausgewählte Kennlinien der peristaltischen Pumpe mit dielektrischen Elastomerstapelaktoren.

Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen in Abschnitt 6.2.2 zeigt deutliche Unterschiede auf. Sowohl der maximal erreichbare Volumenstrom als auch die erreichbare Druckerhöhung werden von der Simulation um ungefähr den Faktor 10 überschätzt. Zieht man allerdings die sehr grobe Modellierung des peristaltischen Pumpsystems in der CFD-Simulation mit in Betracht und berücksichtigt, dass die Simulationsergebnisse zunächst nur als Entscheidungshilfe über die Gestalt der Pumpengeometrie durchgeführt wurden, so ist die Abweichung zwischen Simulationsergebnissen und Messergebnissen durchaus vertretbar.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden dielektrische Elastomeraktoren erstmals für eine fluidische Anwendung eingesetzt. Die peristaltische Förderung einer wässrigen Flüssigkeit konnte demonstriert werden. Um die quasimonolithische peristaltische Pumpe zu realisieren, waren neben der reinen Pumpenentwicklung auch Weiterentwicklungen an der Technologie dielektrischer Elastomerstapelaktoren Teil dieser Arbeit. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsgebiete zusammengefasst und es werden Anknüpfungspunkte für nachfolgende Arbeiten aufgezeigt.

8.1 Weiterentwicklung der Herstellungstechnologie

Die Entwicklung einer verbesserten Anlage zur automatisierten Herstellung der Aktoren war notwendig, um eine reproduzierbare Qualität der Stapelaktoren sicherzustellen. Hierdurch war es im Rahmen der Arbeit möglich, eine große Anzahl von Testaktoren unterschiedlicher Geometrien zur Untersuchung verschiedener Merkmale zu fertigen. Einen Eindruck des hohen Durchsatzes kann das Diagramm in Abbildung 5.1 vermitteln, dessen Datenbasis über 100 funktionsfähige Stapelaktoren bilden.

Das in Abschnitt 3.3.1 vorgestellte modulare Anlagenkonzept hat sich im Rahmen dieser Arbeit bereits mehrfach bewährt. So wurde die Anlage zwischenzeitlich durch ein zweites Modul zur Elektrodenherstellung ergänzt und es ist nun möglich, Elektroden aus zwei unterschiedlichen Materialien zu fertigen oder Aktoren mit bis zu vier verschiedenen Elektrodengeometrien aufzubauen.

Darüber hinaus ist durch das modulare Konzept die Möglichkeit gegeben, die Anlage auch in Zukunft durch weitere Module zu ergänzen. Dies ist für nachfolgende Arbeiten von großem Vorteil. Für die Evaluierung neuer Dielektrika und Elektrodenmaterialien kann auf existierende Prozessschritte zurückgegriffen werden. Die Untersuchung neuer Materialien ist dadurch effizient möglich.

8.1.1 Dielektrikum

Das bereits in der vorhergehenden Arbeit von JUNGSMANN verwendete Materialsystem aus Elastosil® P7670 und dem Graphit MF2 zeigt sich weiterhin als sehr gut geeignet. Die kurze Vernetzungszeit des Silikons sowie der sehr niedrige Elastizitätsmodul sind für die in dieser Arbeit betrachteten Aktoren sehr wichtig. Der dennoch existierende Wunsch nach größeren Auslenkungen oder einer weiteren Reduzierung der Betriebsspannung war Motivation für die Untersuchung des Einflusses nanoskaliger Füllstoffe auf die Materialeigenschaften.

Die in Abschnitt 3.1 dargestellten Ergebnisse lassen keine eindeutige Aussage zu. Auf der einen Seite zeigen die Ergebnisse, dass beispielsweise mit Bariumtitanat eine allgemeine Verbesserung der Aktoreigenschaften zu erwarten ist. Ursache hierfür ist allerdings primär die Erweichung, weniger die gesteigerte Permittivität des Materials. Auf der anderen Seite ist eine homogene Dispergierung der Materialien nur schwer zu erreichen. Diese ist aber notwendig, um die Durchbruchfestigkeit nicht übermäßig herabzusetzen.

Da der größte Einfluss auf die verbesserten Materialeigenschaften dem verringerten Elastizitätsmodul zuzuschreiben ist, können in Zukunft weit mehr Materialien für die Hybridisierung in Betracht gezogen werden, als ausschließlich Materialien mit einer außerordentlich hohen Permittivität. Bezogen auf die Homogenität können aber auch organische Partikel von großem Vorteil sein, da deren Primärpartikel aus einem einzelnen organischen Molekül bestehen und somit kleiner als anorganische Partikel sind.

8.1.2 Elektroden

Ebenso wie die Ebenheit des dielektrischen Films ist für das Funktionieren des Elastomeraktors die gleichmäßige Leitfähigkeit sowie eine geringe Rauigkeit der Elektrode essentiell. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Sprühmodul zeichnet sich daher insbesondere durch die definierbaren Prozessparameter wie Graphitgehalt, Sprühdruk und -dauer aus. Es sind Schichtwiderstände in einem Bereich zwischen $5 \text{ k}\Omega_{\square}$ und $50 \text{ k}\Omega_{\square}$ realisierbar. Ein Wert von $10 \text{ k}\Omega_{\square}$ stellt dabei einen guten Kompromiss zwischen Elektrodenschichtdicke und Leitfähigkeit dar.

Neben Graphit sind Ruß und Kohlenstoffnanoröhren partikuläre kohlenstoffbasierte Materialien, die sehr häufig für Elektroden dielektrischer Elastomeraktoren eingesetzt werden. Sowohl Ruß als auch Kohlenstoffnanoröhren (MWCNT) wurden im Rahmen dieser Arbeit als alternative Materialien zur Elektrodenherstellung untersucht. Die Arbeit mit diesen Materialien war insbesondere hilfreich, um Analysemöglichkeiten der Elektrodenqualität zu entwickeln. Die verwendeten MWCNT zeigen ein sehr hohes Potenzial für bessere Elektroden. Dieses zeigt sich vor allem in Form der hohen Leitfähigkeit und dem geringen Einfluss lateraler Dehnungen auf die Leitfähigkeit. Demgegenüber steht die hohe Oberflächenenergie der Partikel, die die Dispergierung und Sprühbarkeit wesentlich erschwert. Es war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, eine ähnlich gute Reproduzierbarkeit mit MWCNT wie mit dem Graphitsystem zu erreichen.

8.1.3 Fazit

Unter den in Abschnitt 2.3 vorgestellten Strategien zur Herstellung von Stapelaktoren, ist die hier verwendete, die einzige Variante, um mehrere Aktorelemente in ein gemeinsames Substrat planar zu integrieren. Die Möglichkeit, Aktorelemente mit einer Kantenlänge von 1 mm und einer Einzelschichtdicke kleiner $10 \text{ }\mu\text{m}$ zu strukturieren ist weltweit einzigartig.

Die Technologie hat einen Reifegrad erreicht, mit dem sie direkt für weitergehende Arbeiten eingesetzt werden kann. Zwei weitere Verbesserungsmöglichkeiten können allerdings bereits identifiziert werden. Die Prozessstabilität konnte im Rahmen dieser Arbeit deutlich gesteigert werden. Qualitätsvariationen zeigen sich in unregelmäßigen Intervallen, die allerdings deutlich größer als die Kapazität der vorgehaltenen Menge an Silikon ist und über die Kapazität des Graphitsuspensionsvorrats hinausgeht. Bisher ist der Herstellungsprozess nur auf Substratgrößen mit einem Durchmesser von 40 mm eingefahren. Die Verwendung von Substraten mit Durchmessern von bis zu 100 mm würde das Verhältnis von Aktorgröße zu Herstellungszeit wesentlich verbessern.

8.2 Charakterisierung und Modellierung

Die Darstellung der Messtechnik in Kapitel 4 zeigt, dass die eigentlichen Messgrößen an dielektrischen Elastomerstapelaktoren für Standardverfahren zugänglich sind, das tatsächliche Verhalten

der Aktoren aber nur bedingt erfasst werden kann. Die Auslenkung der Aktoren kann an der Aktoroberseite beobachtet werden, aufgrund der geringen Steifigkeit und der allseitigen Einspannung ist die Bewegung der Stapelaktoren in der Regel zwischen Ober- und Unterseite nicht symmetrisch. Der entwickelte Dickenmessplatz ist daher notwendig, um die tatsächliche Auslenkung der Aktoren messen zu können. Ähnlich verhält es sich mit der Bestimmung der elektrischen Impedanz der Aktoren. Widerstand und Kapazität liegen zwar jeweils innerhalb des Messbereichs üblicher LCR-Meter, die Kombination der beiden Größen ist dagegen unüblich, weil es sich weder um kleine Kapazitäten noch um geringe Widerstände handelt. Auch hier erklären die Ergebnisse des eigenen Messplatzes das Aktorverhalten wesentlich besser.

Die Kontaktierung kann als der bisher am wenigsten untersuchte Teil der Stapelaktoren angesehen werden. Die Messergebnisse zeigen, dass die verhältnismäßig einfache Drahtkontaktierung der Stapelaktoren eine durchschnittliche Kontaktierung von mehr als 60 % aller Schichten gewährleistet. Die stabile Kontaktierung der verbleibenden 40 % sollte daher Gegenstand weiterführender Arbeiten sein. Möglichkeiten einer galvanischen Kontaktierung der in den Aktor integrierten Schichten werden aktuell in einer Arbeit aus der gleichen Arbeitsgruppe des Autors dieser Arbeit untersucht [Fli+10]. Eine Alternative mit einer wesentlich höheren Elastizität als metallische Kontaktierungen könnte in Form leitfähiger Polymere bestehen. Bisher steht die mangelnde Benetzbarkeit des Silikons durch das leitfähige Polymer ersten Untersuchungen im Wege.

Die Analyse der elektrischen Impedanz und der Vergleich verschiedener elektrischer Modelle des Stapelaktors sowie der integrierten Elektroden haben gezeigt, dass dielektrische Elastomerstapelaktoren auf Silikonbasis als einfache RC-Glieder betrachtet werden können. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für die weitere Beschreibung des elektromechanischen Verhaltens der Aktoren.

Die nur teilweise bestehende Kontaktierung der Aktorschichten und eventuell vorhandene passive Schutzschichten müssen bei der Beschreibung der Aktorauslenkung berücksichtigt werden. Mit Hilfe des in Abschnitt 5.2.1 entwickelten Modells der statischen Auslenkung kann die Auslenkung existierender Aktoren unter Berücksichtigung des passiven Materials sehr gut beschrieben werden.

Auf gleiche Art wird das passive Material im Modell des dynamischen Aktorverhaltens berücksichtigt. Die frequenzabhängige Aktorauslenkung kann mit einem einfachen 3-Element-Modell beschrieben werden. Hierzu ist es lediglich notwendig, das Dämpfungselement des Standard-Festkörpermodells durch ein verallgemeinertes Element mit fraktionaler Ableitung zu ersetzen. Dieses dynamische Modell ist in der Lage, die geringe aber deutlich erkennbare Verringerung der Auslenkung über mehr als drei Dekaden zu erklären.

8.3 Peristaltische Pumpe

Dielektrische Elastomeraktoren wurden in der Vergangenheit sehr häufig als künstliche Muskeln beschrieben. Tatsächlich kann die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte peristaltische Pumpe als eine bionische Umsetzung des aus der Natur bekannten Fluidförderprinzips angesehen werden.

Wie das biologische Vorbild besteht auch die hier entwickelte Pumpe nahezu vollständig aus aktivem Material, das eine wellenförmige Bewegung ausführt. Die Messergebnisse in Abschnitt 7.4 zeigen, dass der Transport einer wässrigen Flüssigkeit mit einem maximalen Volumenstrom von 11 $\mu\text{l}/\text{min}$ und gegen einen Höchstdruck von fast 0,4 kPa möglich ist. Diese peristaltische Pumpe ist damit die erste fluidische Anwendung dielektrischer Elastomeraktoren.

Die Herstellungstechnologie ermöglicht die Fertigung des Pumpenkörpers in einem durchgehenden Prozessablauf, inklusive der Präparation des durchgehenden Fluidkanals. Lediglich die

Schlauchverbindung und die elektrische Kontaktierung muss nachträglich manuell vorgenommen werden.

Aufgrund der notwendigen technologischen Tätigkeiten war es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, umfangreiche Optimierungen der Pumpengeometrie vorzunehmen. Daher ist zu erwarten, dass eine Fortführung der Arbeit die Leistungsdaten der Pumpe wesentlich verbessern kann. Die Anknüpfungspunkte sind vielfältig. Eine größere Aktorauslenkung wird den Volumenstrom erhöhen. Aber auch höhere Betriebsfrequenzen werden zu einem höheren Volumenstrom führen. Wie der Auslenkungsfrequenzgang der Aktoren zeigt, stehen bei einer Frequenz von 100 Hz ungefähr 75 % der Auslenkung bei 10 Hz zur Verfügung. Werden viskose und hydrodynamische Effekte vernachlässigt, könnte sich der Volumenstrom durch eine Verzehnfachung der Frequenz immerhin um den Faktor 7,5 erhöhen.

Der zulässige Gegendruck wird durch eine Versteifung des Pumpenkörpers zu erhöhen sein. Um die Kanalauslenkung nicht zu beeinträchtigen, ist es zielführend, nur die Außenseite der Pumpe zu versteifen. Wenn ein entsprechendes Silikonmaterial zur Verfügung steht, kann die Prozessierung einer Versteifungsschicht leicht in die modulare Anlage integriert werden und der durchgehende Ablauf der Pumpenfertigung kann beibehalten werden.

Für die Herstellung der in dieser Arbeit untersuchten Pumpenexemplare war es notwendig, die Elektroden seitlich durch einen kleinen Abstand voneinander zu isolieren, siehe Abbildung 8.1(a). Dieser kleine passive Bereich wird bei der Aktivierung der Aktorelemente weniger verformt und stellt somit eine Kanalverengung dar. Zukünftige peristaltische Pumpen können dies umgehen, indem die beiden vorhandenen Sprühmodule der Herstellungsanlage zur Fertigung genutzt werden. Unter Verwendung von zwei Maskensätzen für die Aktorelektroden ist es möglich, die Elektroden benachbarter Aktorelemente in unterschiedlichen Schichten aufzubringen. Wie Abbildung 8.1(b) zeigt, können die Aktorelemente auf diese Weise nahtlos aneinander gereiht werden. Dies führt dazu, dass zwei dielektrische Schichten die Elektroden trennen. Um die Betriebsspannung nicht zu erhöhen, bietet es sich an, die Einzelschichtdicke entsprechend zu reduzieren.

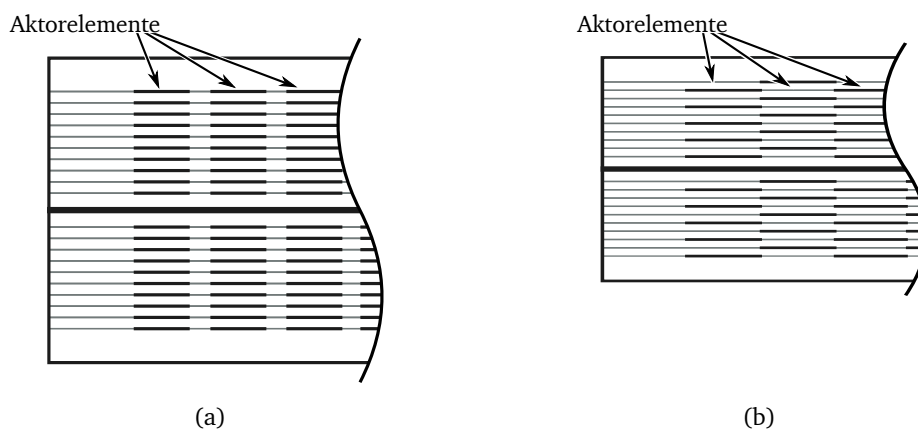


Abbildung 8.1: Anordnung der Aktorelemente. (a) aktuell realisierte Variante mit Isolationsabstand; (b) mögliche Verbesserung durch Anordnung benachbarter Elektroden in versetzten Schichten.

Eine weitere Funktionalität kann der peristaltischen Pumpe durch die Nutzung der sensorischen Eigenschaften der Aktoren hinzugefügt werden. Der durch die Pumpe aufgebaute Druck im Fluid wirkt auf den Pumpenkörper zurück und dehnt diesen. Die Messung der momentanen Aktorkapazität oder der Leitfähigkeit zusätzlicher Sensorelektroden bietet die Möglichkeit den Betriebszustand der Pumpenaktoren und der gesamten Pumpe zu überwachen.

Die oben angesprochene Erhöhung der Betriebsfrequenz ist nicht ohne weiteres durchzuführen. Kann nicht auf kostspielige Hochspannungsquellen zurückgegriffen werden, können DC-DC-Konverter eine Alternative sein. Bisher bekannte und zur Verfügung stehende Bausteine können allerdings Sinus- und Rechtecksignale nur bis zu einer Frequenz von ca. 10 Hz verzerrungsfrei wiedergeben. Ab Frequenzen über 30 Hz können die notwendigen Spannungsamplituden von 1,5 kV nicht mehr erzeugt werden. Abhilfe könnte somit auch hier wieder eine Reduzierung der Betriebsspannung durch verbesserte Materialien schaffen, wie sie zu Beginn dieser Zusammenfassung erwähnt wurde.

Insgesamt konnte im Rahmen dieser Arbeit die Tauglichkeit dielektrischer Elastomeraktoren für eine fluidische Anwendung demonstriert werden. Das verwendete Silikonmaterial ist unempfindlich gegenüber einer Vielzahl von Flüssigkeiten. Ausgehend von der Theorie peristaltischer Strömungen kann davon ausgegangen werden, dass höhere Viskositäten von Vorteil für die Pumpleistung sind. Es ist zu erwarten, dass die Förderung unpolarer Flüssigkeiten aufgrund der besseren Benetzbarkeit einfacher möglich ist. Dass die Pumpe nicht auf die Förderung unpolarer Flüssigkeiten beschränkt ist, zeigen die mit einer wässrigen Flüssigkeit im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse.

Aufgrund der vollständigen Elastizität des Pumpenkörpers werden sich Vorteile makroskopischer Schlauchpumpen auf diese Pumpe übertragen lassen. Auch diese Pumpe wird eine hohe Toleranz gegenüber im Fluid vorhandener Partikel aufweisen. Die Scherrate ist proportional zur Bewegung der Kanalwand und damit zur Betriebsfrequenz. Bei niedrigen Frequenzen kann diese Größe daher sehr klein gehalten werden.

Mögliche Anwendungen einer peristaltischen Pumpe aus Elastomeraktoren können somit aus unterschiedlichen Gebieten kommen. Aus der Pharmazie, Biologie und Medizintechnik zum Transport biologischer Flüssigkeiten mit lebenden Zellen. Aus der Verfahrenstechnik zur Dosierung viskoser Klebstoffe, von Suspensionen und Dispersionen. Anwendung kann diese Pumpe aber auch überall dort finden, wo es auf sehr geringes Gewicht ankommt.



Literaturverzeichnis

- [AJ90] S. AHMED und F. R. JONES. „A review of particulate reinforcement theories for polymer composites“. In: *Journal of Materials Science* 25.12 (1990), S. 4933–4942.
- [AZJ09] F. AMIROUCHE, Y. ZHOU und T. JOHNSON. „Current micropump technologies and their biomedical applications“. In: *Microsystem Technologies* (2009).
- [And86] R. A. ANDERSON. „Mechanical Stress in a Dielectric Solid from a Uniform Electric Field“. In: *Physical Review B* 33.2 (1986), S. 1302–1307.
- [ANS08] M. ASCHWANDEN, D. NIEDERER und A. STEMMER. „Tunable transmission grating based on dielectric elastomer actuators“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 6927. San Diego, California, USA: SPIE, 2008.
- [BBr08] B. BRAUN MELSUNGEN AG. *Space. Produktkatalog*. 2008.
- [BC01] Y. BAR-COHEN. *Electroactive Polymer (EAP): Actuators as Artificial Muscles*. SPIE Press, 2001.
- [BC06] Y. BAR-COHEN. *Biomimetics - biologically inspired technologies*. Boca Raton [u.a.]: CRC, Taylor und Francis, 2006.
- [BCC00] Y. BAR-COHEN und Z. CHANG. „Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump“. In: *Proceedings of SPIE. Int. Symp. Smart Structures and Materials* (2000).
- [BCC01] Y. BAR-COHEN und Z. CHANG. „Piezoelectrically Actuated Miniature Peristaltic Pump“. In: *Proceedings of SPIE. Smart Structures and Materials* (2001).
- [Bax03] M. BAXENDALE. „The physics and applications of carbon nanotubes“. In: *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 14.10 (2003), S. 657–659.
- [Bee67] L. K. H. VAN BEEK. „Dielectric Behaviour of Heterogeneous Systems“. In: *Progress in Dielectrics*. Hrsg. von J. B. BIRKS. Bd. 7. London: Heywood Books, 1967, S. 69–114.
- [BGSL02] M. BENSLIMANE, P. GRAVESEN und P. SOMMER-LARSEN. „Mechanical properties of dielectric elastomer actuators with smart metallic compliant electrodes“. In: *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 4695. San Diego, CA, USA: SPIE, 2002, S. 150–157.
- [Ben+08] M. BENSLIMANE, H.-E. KIIL, M. HAMANN, K. GRAVESEN und M. TRYSON. *Danfoss Poly-Power A/S - Workshop. 30.10.2008*. Nordborg 2008.
- [Ber+03] J. M. BERG, R. ANDERSON, M. ANAYA und ET AL. „A two-stage discrete peristaltic micropump“. In: *Sensors and Actuators A*. 104.1 (2003), S. 6–10.
- [Boc+06] V. BOCHAROVA, A. KIRIY, U. OERTEL, M. STAMM, F. STOFFELBACH, R. JEROME und C. DETREMBLEUR. „Ultrathin Transparent Conductive Films of Polymer-Modified Multiwalled Carbon Nanotubes“. In: *Journal of Physical Chemistry B* 110.30 (2006), S. 14640–14644.
- [Cam+04] C. G. CAMERON, R. S. UNDERHILL, M. RAWJI und J. P. SZABO. „Conductive filler: elastomer composites for Maxwell stress actuator applications“. In: *Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 5385. San Diego, CA, USA: SPIE, 2004, S. 51–59.

- [Cam+08] C. G. CAMERON, J. P. SZABO, S. JOHNSTONE, J. MASSEY und J. LEIDNER. „Linear actuation in coextruded dielectric elastomer tubes“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 147.1 (2008), S. 286–291.
- [CP97] E. O. CAREW und T. J. PEDLEY. „An active membrane model for peristaltic pumping. 1. Periodic activation waves in an infinite tube“. In: *Journal of Biomechanical Engineering - Transactions of the ASME* 119.1 (1997), S. 66–76.
- [CFR06] F. CARPI, G. FANTONI und D. DE ROSSI. „Bubble-like Dielectric Elastomer Actuator With Integrated Sensor: Device And Applications“. In: *Conference Proceedings: Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2006, Bremen*. Hrsg. von H. BORGMANN. 2006, S. 872–875.
- [CMR05] F. CARPI, A. MIGLIORE und D. DE ROSSI. „A new contractile linear actuator made of dielectric elastomers“. In: *SPIE Proceedings Smart Structures and Materials* 5759 (2005).
- [CR04] F. CARPI und D. DE ROSSI. „Theoretical Description and Fabrication of a new Dielectric Elastomer Actuator showing Linear Contractions“. In: *Conference Proceedings. ACTUATOR 2004. 9th International Conference on New Actuators & 3rd International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems 14 - 16 June 2004 Bremen, Germany*. 2004.
- [CR05] F. CARPI und D. DE ROSSI. „Improvement of electromechanical actuating performances of a silicone dielectric elastomer by dispersion of titanium dioxide powder“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 12.4 (2005), S. 835–843.
- [CR06] F. CARPI und D. DE ROSSI. „A New Contractile Linear Actuator Made of Dielectric Elastomers With Folded Structure“. In: *Conference Proceedings: Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2006, Bremen*. Hrsg. von H. BORGMANN. 2006, S. 101–103.
- [CSR07] F. CARPI, C. SALARIS und D. DE ROSSI. „Folded dielectric elastomer actuators“. In: *Smart Materials and Structures* 16.2 (2007), S300–S305.
- [Car+03] F. CARPI, P. CHIARELLI, A. MAZZOLDI und D. DE ROSSI. „Electromechanical characterisation of dielectric elastomer planar actuators: comparative evaluation of different electrode materials and different counterloads“. In: *Sensors and Actuators A* 107 (2003), S. 95–95.
- [Car+05] F. CARPI, A. MIGLIORE, G. SERRA und D. DE ROSSI. „Helical dielectric elastomer actuators“. In: *Smart Materials and Structures* 14.6 (2005), S. 1210–1216.
- [Car+08] F. CARPI, G. GALLONE, F. GALANTINI und D. DE ROSSI. „Silicone-poly(hexylthiophene) blends as elastomers with enhanced electromechanical transduction properties“. In: *Advanced Functional Materials* 18.2 (2008), S. 235–241.
- [CBC99] Z. CHANG und Y. BAR-COHEN. „Piezopumps using no physically moving parts“. In: *Miniature Vacuum Pumps Workshop* (1999).
- [Che05] E. A. CHERNEY. „Silicone rubber dielectrics modified by inorganic fillers for outdoor; high voltage insulation applications“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 12.6 (2005), S. 1108–1115.
- [Cho+02] H. R. CHOI, S. M. RYEW, K. M. JUNG, H. M. KIM, J. W. JEON u. a. „Soft actuator for robotic applications based on dielectric elastomer: quasi-static analysis“. In: *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on* 3 (2002), S. 3212–3217.

-
- [Chu+07] N. H. CHUC, J. K. PARK, D. V. THUY, H. S. KIM, J. C. KOO u. a. „Multi-stacked artificial muscle actuator based on synthetic elastomer“. In: *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007* (2007), S. 771.
- [CW93] H. CLAUSERT und G. WIESEMANN. *Grundgebiete der Elektrotechnik 2 - Wechselströme, Drehstrom, Leitungen, Anwendungen der Fourier-, der Laplace- und der Z-Transformation*. 6., verb. Aufl. München, Wien: R. Oldenbourg, 1993.
- [Cum+01] L. CUMMINGS, A. GIBSON, S. GRAHAM, P. HOWELL, P. HUGGINS u. a. „The Effect of Ureteric Stents on Urine Flow“. In: *UK Mathematics in Medicine Study Group. 10th - 14th September 2001. Nottingham*. (2001).
- [Dan+03] Z.-M. DANG, L. Z. FAN, Y. SHEN und C.-W. NAN. „Dielectric behavior of novel three-phase MWNTs/BaTiO₃/PVDF composites“. In: *Materials Science and Engineering: B* 103.2 (2003), S. 140–144.
- [DDT06] I. DIACONU, D.-O. DORHOI und F. TOPOLICEANU. „Electrostriction of a Polyurethane Elastomer-Based Polyester“. In: *Sensors Journal, IEEE* 6.4 (2006), S. 876–880.
- [DDG96] C. J. DIAS und D. K. DAS-GUPTA. „Inorganic Ceramic / Polymer Ferroelectric Composite Electrets“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 3.5 (1996), S. 706–734.
- [DIN98] Norm DIN EN 60243-1. *Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen: Prüfungen bei technischen Frequenzen*.
- [DIN01] Norm DIN EN 60243-2. *Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen: Prüfungen mit Gleichspannung*.
- [DRK05] P. DUBOIS, S. ROSSET und S. KOSTER. „Microactuators Based on Ion-Implanted Dielectric Electroactive Polymer Membranes (EAP)“. In: *Transducers 2005, 13th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems 2005, 5.-9. June, Seoul, Korea. 2005*. Bd. 2. 2005, S. 2048–2051.
- [Dub+08] P. DUBOIS, S. ROSSET, M. NIKLAUS, M. DADRAS und H. R. SHEA. „Voltage Control of the Resonance Frequency of Dielectric Electroactive Polymer (DEAP) Membranes“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 17.5 (2008), S. 1072–1081.
- [EBP58] A. G. EMSLIE, F. T. BONNER und L. G. PECK. „Flow of a Viscous Liquid on a Rotating Disk“. In: *Journal of Applied Physics* 29.5 (1958), S. 858–862.
- [Fli07] K. FLITTNER. „Aufbau eines Messplatzes zur Erfassung der statischen und dynamischen Auslenkung dielektrischer Polymeraktoren und Verifikation mathematischer Modelle“. Studienarbeit 1647. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Fli+10] K. FLITTNER, M. SCHLOSSER, M. MATYSEK, P. LOTZ und H. F. SCHLAAK. „Integration of dielectric elastomer stack actuators into micro systems“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. San Diego, CA, USA: SPIE, 2010. Zur Veröffentlichung eingereicht.
- [FG08] J. W. FOX und N. C. GOULBOURNE. „Nonlinear dynamic characteristics of dielectric elastomer membranes“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 6927. San Diego, California, USA: SPIE, 2008.
- [FMB96] N. E. FROST, P. B. MCGRATH und C. W. BURNS. „Effect of fillers on the dielectric properties of polymers“. In: *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 1996, S. 300–303.
-

- [FY68] Y. C. FUNG und C. S. YIH. „Peristaltic Transport“. In: *Transactions of the ASME: Journal of Applied Mechanics* 35 (1968), S. 669–675.
- [GTH06] M. GALL, B. THIELICKE und A. HUART. „Development Of A Peristaltic Micro-Pump Based On PZT Bending Actuators“. In: *Conference Proceedings: Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2006, Bremen*. Hrsg. von H. BORGMANN. 2006, S. 756–759.
- [Gal+07] G. GALLONE, F. CARPI, D. DE ROSSI, G. LEVITA und A. MARCHETTI. „Dielectric constant enhancement in a silicone elastomer filled with lead magnesium niobate-lead titanate“. In: *Materials Science and Engineering C* 27.1 (2007), S. 110–116.
- [Gei+07] A. GEIPEL, A. DOLL, P. JANTSCHKEFF, N. ESSER, U. MASSING, P. WOIAS und F. GOLDSCHMIDT-BOEING. „A novel two-stage backpressure-independent micropump: modeling and characterization“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17.5 (2007), S. 949–959.
- [Gem36] A. GEMANT. „A Method of Analyzing Experimental Results Obtained from Elasto-Viscous Bodies“. In: *Physics* 7.8 (1936), S. 311–317.
- [Gen92] A. N. GENT. *Engineering with rubber - How to design rubber components*. Hrsg. von A. N. GENT. 2. Aufl. München: Hanser, 1992.
- [Gis+08] T. A. GISBY, E. P. CALIUS, S. XIE und I. A. ANDERSON. „An adaptive control method for dielectric elastomer devices“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 6927. San Diego, California, USA: SPIE, 2008.
- [God08] T. GODFREY. „Strain effects on percolation conduction in conductive particle filled composites“. In: *Journal of Materials Science* 43.3 (2008), S. 1128–1134.
- [Gou+05] J. GOULPEAU, D. TROUCHET, A. AJDARI und P. TABELING. „Experimental study and modeling of polydimethylsiloxane peristaltic micropumps“. In: *Journal of Applied Physics* 98.4 (2005).
- [Gu+04] W. GU, X. ZHU, N. FUTAI, B. S. CHO und S. TAKAYAMA. „Computerized microfluidic cell culture using elastomeric channels and Braille displays“. In: *Proc. National Academy of Sciences of the USA* 101.45 (2004), S. 15861–15866.
- [Ha+06] S. M. HA, YUAN, WEI, Q. PEI, R. E. PELRINE und S. STANFORD. „Interpenetrating polymer networks for high-performance electroelastomer; artificial muscles“. In: *Advanced Materials* 18.7 (2006).
- [Ha+07] S. M. HA, W. YUAN, Q. PEI, R. E. PELRINE und S. STANFORD. „Interpenetrating networks of elastomers exhibiting 300% electrically-induced area strain“. In: *Smart Materials and Structures* 16.2 (2007), S280–S287.
- [Ham07] M. HAMANN. „Charakterisierung und Optimierung des Schleuderprozesses zu Herstellung dielektrischer Polymeraktoren“. Diplomarbeit 1652. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Hau04] M. HAUTH. *Visual simulation of deformable models*. Tübingen, Univ., Diss., 2004.
- [Hey+98] R. HEYDT, R. KORNBLUH, R. E. PELRINE und ET AL. „Design and Performance of an Electrostrictive-Polymer-Film Acoustic Actuator“. In: *Journal of Sound and Vibration* 215.2 (1998), S. 297–311.
- [Hey+00] R. HEYDT, R. E. PELRINE, J. P. JOSEPH und ET AL. „Acoustical performance of an electrostrictive polymer film loudspeaker“. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 107.2 (2000), S. 833–839.

-
- [Hir+96] T. HIRAI, H. SADATOH, T. UEDA, T. KASAZAKI, Y. KURITA, M. HIRAI und S. HAYASHI. „Polyurethane-elastomer-actuator“. In: *Angewandte Makromolekulare Chemie* 240.1 (1996), S. 221–229.
- [HHL06] C.-W. HUANG, S.-B. HUANG und G.-B. LEE. „Pneumatic micropumps with serially connected actuation chambers“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.11 (2006), S. 2265–2272.
- [Iij91] S. IIJIMA. „Helical microtubules of graphitic carbon“. In: *Nature* 354.6348 (1991), S. 56–58.
- [IG08] B. D. IVERSON und S. V. GARIMELLA. „Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation“. In: *Microfluidics and Nanofluidics* 5.2 (2008), S. 145–174.
- [JS71] M. Y. JAFFRIN und A. H. SHAPIRO. „Peristaltic Pumping“. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 3 (1971), S. 13–36.
- [Jan+07] L.-S. JANG, Y.-J. LI, S.-J. LIN, Y.-C. HSU, W.-S. YAO, M.-C. TSAI und C.-C. HOU. „A stand-alone peristaltic micropump based on piezoelectric actuation“. In: *Biomedical Microdevices* 9.2 (2007), S. 185–194.
- [Jeo+05] O. C. JEONG, S. W. PARK, S. S. YANG und J. J. PAK. „Fabrication of a peristaltic PDMS micropump“. In: *Sensors & Actuators: A. Physical* 123-124 (2005), S. 453–458.
- [JKC08] K. JUNG, K. J. KIM und H. R. CHOI. „A self-sensing dielectric elastomer actuator“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 143.2 (2008), S. 343–351.
- [Jun+07] K. JUNG, J. LEE, M. CHO, J. C. KOO, J.-D. NAM, Y. LEE und H. R. CHOI. „Development of enhanced synthetic elastomer for energy-efficient polymer actuators“. In: *Smart Materials and Structures* 16.2 (2007), S288–S294.
- [Jun04] M. JUNGSMANN. „Entwicklung elektrostatischer Festkörperaktoren mit elastischen Dielektrika für den Einsatz in taktischen Anzeigefeldern“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2004.
- [JMS04] M. JUNGSMANN, M. MATYSEK und H. F. SCHLAACK. „Electrostatic solid-state Actuators with elastic Dielectric and Multilayer Fabrication Technology“. In: *Conference proceedings / Actuator 2004, 9th International Conference on New Actuators & 3rd International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2004, Bremen, Germany*. Hrsg. von H. BORGMANN. Bremen: HVG, Hanseatische Veranstaltungs-GmbH, Division Messe Bremen, 2004.
- [JS02] M. JUNGSMANN und H. F. SCHLAACK. „Miniaturised Electrostatic Tactile Display with High Structural Compliance“. In: *Proceedings Eurohaptics 2002, 8-10 July, Edinburgh, U.K.* Hrsg. von S. A. WALL, B. RIEDEL, A. CROSSAN und M. R. MCGEE. 2002.
- [Kao84] K. C. KAO. „New theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulators“. In: *Journal of Applied Physics* 55.3 (1984), S. 752–755.
- [Kao04] K. C. KAO. *Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes*. Amsterdam [u.a.]: Elsevier Academic Press, 2004.
- [Ker56] E. H. KERNER. „The Elastic and Thermo-elastic Properties of Composite Media“. In: *Proceedings of the Physical Society. Section B* 69.8 (1956), S. 808–813.
- [KB09] H.-E. KIIL und M. BENSLIMANE. „Scalable industrial manufacturing of DEAP“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. 1. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, 72870R–10.
-

- [KOC06] E.-G. KIM, J.-G. OH und B. CHOI. „A study on the development of a continuous peristaltic micropump using magnetic fluids“. In: *Sensors & Actuators: A. Physical* 128.1 (2006), S. 43–51.
- [Kir73] S. KIRKPATRICK. „Percolation and Conduction“. In: *Rev. Mod. Phys.* 45.4 (1973), S. 574–588.
- [Koe84] R. C. KOELLER. „Applications of Fractional Calculus to the Theory of Viscoelasticity“. In: *Journal of Applied Mechanics* 51.2 (1984), S. 299–307.
- [Kof01] G. KOFOD. „Dielectric elastomer actuators“. Diss. Riso: Technical University of Denmark, 2001.
- [Kof06] G. KOFOD. „High Strain Materials For Electro-Elastomer Actuators“. In: *Conference Proceedings: Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2006, Bremen*. Hrsg. von H. BORGMANN. 2006, S. 885–888.
- [Kof08] G. KOFOD. „The static actuation of dielectric elastomer actuators: how does pre-stretch improve actuation?“. In: *Journal of Physics D - Applied Physics* 41.21 (2008).
- [KSL05] G. KOFOD und P. SOMMER-LARSEN. „Some aspects of large strain actuation in dielectric elastomers“. In: *Electrets, 2005. ISE-12. 2005 12th International Symposium on* (2005), S. 208–211.
- [KSL08] G. KOFOD und P. SOMMER-LARSEN. „Compliant Electrodes: Solutions, Materials and Technologies“. In: *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers - Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. Hrsg. von F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN. Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2008, S. 69–76.
- [Kof+01] G. KOFOD, R. KORNBLUH, R. E. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN. „Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers“. In: *Proceedings of SPIE*. Bd. 4329. 2001, S. 141–147.
- [Kol+09] M. KOLLOSCH, M. MELZER, A. BECKER, H. STOYANOV, D. N. MCCARTHY, H. RAGUSCH und G. KOFOD. „The influence of mechanical properties in the electrical breakdown in poly-styrene-ethylene-butadiene-styrene thermoplastic elastomer“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009.
- [KP08] R. KORNBLUH und R. E. PELRINE. „High-Performance Acrylic and Silicone Elastomers“. In: *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers - Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. Hrsg. von F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN. Amsterdam: Elsevier, 2008, S. 33–42.
- [Kor+98] R. KORNBLUH, R. E. PELRINE, J. ECKERLE und J. P. JOSEPH. „Electrostrictive polymer artificial muscle actuators“. In: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998*. 3 (1998), S. 2147–2154.
- [Kor+99] R. KORNBLUH, R. E. PELRINE, J. P. JOSEPH, R. HEYDT, Q. PEI und S. CHIBA. „High-field electrostriction of elastomeric polymer dielectrics for actuation“. In: *Proceedings of SPIE. Smart Structures and Materials*. Bd. 3669. 1999, 149ff.
- [Kor+00] R. KORNBLUH, R. E. PELRINE, Q. PEI, S. OH und J. P. JOSEPH. „Ultrahigh strain response of field-actuated elastomeric polymers“. In: *Proceedings of SPIE. Smart Structures and Materials*. Bd. 3987. 2000, S. 51–63.

-
- [KD09] G. KOVACS und L. DÜRING. „Contractive tension force stack actuator based on soft dielectric EAP“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. 1. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, 72870A–15.
- [Kov+08] G. KOVACS, S. M. HA, S. MICHEL, R. E. PELRINE und Q. PEI. „Study on core free rolled actuator based on soft dielectric EAP“. In: *Smart Structures / NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) X. Proceedings of SPIE*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 6927. Bellingham, WA: SPIE, 2008, S. X9270.
- [KRB99] I. KRAKOVSKY, T. ROMIJN und A. P. DE BOER. „A few remarks on the electrostriction of elastomers“. In: *Journal of Applied Physics* 85.1 (1999), S. 628–629.
- [Lau+06] G. K. LAU, GOOSEN, J. F. L., F. VAN KEULEN, P. J. FRENCH und P. M. SARRO. „Actuated elastomers with rigid vertical electrodes“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.6 (2006), S35–S44.
- [LPW01] A. LENK, G. PFEIFER und R. WERTHSCHÜTZKY. *Elektromechanische Systeme - mechanische und akustische Netzwerke, deren Wechselwirkungen und Anwendungen*. Berlin [u.a.]: Springer, 2001, S. XIII, 333. ISBN: 3-540-67941-3.
- [LFL71] H. S. LEW, Y. C. FUNG und C. B. LOWENSTEIN. „Peristaltic carrying and mixing of chyme in the small intestine (An analysis of a mathematical model of peristalsis of the small intestine)“. In: *Journal of Biomechanics* 4.4 (1971), S. 297–315.
- [Lic24a] K. LICHTENECKER. „Der elektrische Leitungswiderstand künstlicher und natürlicher Aggregate“. In: *Physikalische Zeitschrift* 25 (1924), 169ff, 193ff, 225ff.
- [Lic24b] K. LICHTENECKER. „Über eine Analogie im Verhalten leitender und nichtleitender Mischkörper“. In: *Physikalische Zeitschrift* 25 (1924), 666ff.
- [LR31] K. LICHTENECKER und K. ROTHER. „Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus Allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung“. In: *Physikalische Zeitschrift* 32 (1931), S. 255–260.
- [Lin+88] H. T. G. VAN LINTEL, V. DE, F. C. M. POL und S. BOUWSTRA. „A piezoelectric micro-pump based on micromachining of silicon“. In: *Sensors and Actuators* 15.2 (1988), S. 153–167.
- [LZK05] C. LÖWE, X. ZHANG und G. KOVACS. „Dielectric Elastomers in Actuator Technology“. In: *Advanced Engineering Materials* 7.5 (2005), S. 361–367.
- [Mat03] M. MATYSEK. „Messtechnische Charakterisierung elektrostatischer Aktoren mit elastischem Dielektrikum“. Diplomarbeit 1535. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2003.
- [Mat09] M. MATYSEK. „Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays“. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2009.
- [MCA09] T. G. MCKAY, E. P. CALIUS und I. A. ANDERSON. „The dielectric constant of 3M VHB: a parameter in dispute“. In: Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, 72870P–10.
- [NMD00] S. NATARAJAN und M. R. MOKHTARZADEH-DEGHAN. „Numerical prediction of flow in a model of a (potential) soft acting peristaltic blood pump“. In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32.6 (2000), S. 711–724.
- [Nel99] N. NELIK. *Centrifugal and rotatory Pumps - Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [Nes04] B. NESBITT. „When is a tube not a tube? When it’s a pump“. In: *World Pumps* 448 (2004), S. 20–23.
-

- [Nes06] B. NESBITT. *Handbook of Pumps and Pumping*. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [Nie70] L. E. NIELSEN. „Generalized Equation for the Elastic Moduli of Composite Materials“. In: *Journal of Applied Physics* 41.11 (1970), S. 4626–4627.
- [Ogd97] R. W. OGDEN. *Non-linear Elastic Deformations*. Mineola: Dover Publications, 1997.
- [Opr+09] D. M. OPRIS, D. CRESPI, C. LOWE, M. MOLBERG und F. NUESCH. „Phthalocyanine and encapsulated polyaniline nanoparticles as fillers for dielectric elastomers“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, S. 72870L–8.
- [Orc04] B. ORCHARD. „Laboratories and industry provide opportunities for peristaltic pumps“. In: *World Pumps* 448 (2004), S. 24–26.
- [PKJ98] R. E. PELRINE, R. KORNBLUH und J. P. JOSEPH. „Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 64.1 (1998), S. 77–85.
- [Pel+97] R. E. PELRINE, R. KORNBLUH, J. P. JOSEPH und S. CHIBA. „Electrostriction of polymer films for microactuators“. In: *Micro Electro Mechanical Systems, 1997. MEMS '97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International Workshop on* (1997), S. 238–243.
- [Pel+00a] R. E. PELRINE, R. KORNBLUH, J. P. JOSEPH, R. HEYDT, Q. PEI und S. CHIBA. „High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators“. In: *Materials Science and Engineering C* 11 (2000), S. 89–100.
- [Pel+00b] R. E. PELRINE, R. KORNBLUH, Q. PEI und ET AL. „High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%“. In: *Science* 287.4 (2000), S. 836–839.
- [Pel+01] R. E. PELRINE, P. SOMMER-LARSEN, R. KORNBLUH, R. HEYDT, G. KOFOD, Q. PEI und P. GRAVESEN. „Applications of dielectric elastomer actuators“. In: *Proceedings of SPIE*. Bd. 4329. 2001, S. 335–349.
- [Pel+02] R. E. PELRINE, R. KORNBLUH, Q. PEI, S. STANFORD, S. OH u. a. „Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion“. In: *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 4695. San Diego, CA, USA: SPIE, 2002, S. 126–137.
- [Pfi06] T. PFITZENREITER. „Mesoskopische Modelle mit fraktionalen Ableitungen in Dehnungs-Spannungs-Relationen“. Diss. Hamburg 2006.
- [PSK04] A. PIMPIN, Y. SUZUKI und N. KASAGI. „Micro electrostrictive actuator with metal compliant electrodes for flow control applications.“ In: *17th IEEE Int. Conf. MEMS* (2004), S. 478–481.
- [Ree88] G. REESE. *Modelle peristaltischer Strömungen*. Bd. 134. Fortschrittsberichte der VDI Zeitschriften. Reihe 7: Strömungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1988.
- [Ros+08a] S. ROSSET, M. NIKLAUS, V. STOJANOV, A. FELBER, P. DUBOIS und H. R. SHEA. „Ion-implanted compliant and patternable electrodes for miniaturized dielectric elastomer actuators“. In: *Smart Structures / NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) X. Proceedings of SPIE*. Bd. 6927. Bellingham: SPIE, 2008, W9270–W9270.
- [Ros+08b] S. ROSSET, M. NIKLAUS, P. DUBOIS und H. R. SHEA. „Mechanical characterization of a dielectric elastomer microactuator with ion-implanted electrodes“. In: *Sensors and Actuators A - Physical* 144.1 (2008), S. 185–193.

-
- [Ros+09] S. ROSSET, M. NIKLAUS, P. DUBOIS und H. R. SHEA. „Ion-implanted compliant electrodes for mm-size dielectric elastomer actuators“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, S. 72870C–8.
- [Roy+05] M. ROY, J. NELSON, R. MACCRONE, L. SCHADLER, C. REED und R. KEEFE. „Polymer nanocomposite dielectrics-the role of the interface“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 12.4 (2005), S. 629–643.
- [SG01] A. SCHMIDT und L. GAUL. „Bestimmung des komplexen Elastizitätsmoduls eines Polymers zur Identifikation eines viskoelastischen Stoffgesetzes mit fraktionalen Zeitableitungen“. In: *Zerstörungsfreie Materialprüfung: DGZfP-Jahrestagung 2001: ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung. Berlin, 21.-23. Mai 2001*. Hrsg. von DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE MATERIALPRÜFUNG. Berlin: DGZfP, 2001.
- [Sch04] F. SCHÖN. „Elastomer / Schichtsilikat Komposite: Einfluss der Füllstoffstruktur auf mechanische, dynamische und Gasbarriere-Eigenschaften“. Diss. Freiburg: Albert-Ludwigs Universität, 2004.
- [Sch+08] H.-J. SCHREINER, T. BAIER, H. BAUMANN, R. BINDIG, M. GALL, H. SCHMITZ und B. THIELCKE. „Development of an Implantable Peristaltic Micropump System“. In: *Conference proceedings: Actuator 2008, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 9-11 June 2008, Bremen, Germany*. 2008, S. 827–830.
- [SGS07a] R. SHANKAR, T. K. GHOSH und R. J. SPONTAK. „Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators“. In: *Soft Matter* 3.9 (2007), S. 1116–1129.
- [SGS07b] R. SHANKAR, T. K. GHOSH und R. J. SPONTAK. „Electroactive Nanostructured Polymers as Tunable Actuators“. In: *Advanced Materials* 19.17 (2007), S. 2218–2223.
- [SGS09] R. SHANKAR, T. K. GHOSH und R. J. SPONTAK. „Mechanical and actuation behavior of electroactive nanostructured polymers“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 151.1 (2009), S. 46–52.
- [SJW69] A. H. SHAPIRO, M. Y. JAFFRIN und S. L. WEINBERG. „Peristaltic pumping with long wavelengths at low Reynolds number“. In: *Journal of Fluid Mechanics* 37.4 (1969), S. 799–825.
- [SK96] Y. SHKEL und D. KLINGENBERG. „Material parameters for electrostriction“. In: *Journal of Applied Physics* 80.8 (1996), S. 4566–4572.
- [Smi85] J. G. SMITS. *Piezo-electrical micropump*. Techn. Ber. 1985.
- [Smi90] J. G. SMITS. „Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 21.1-3 (1990), S. 203–206.
- [SLL04] P. SOMMER-LARSEN und A. L. LARSEN. „Materials for dielectric elastomer actuators“. In: *Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 5385. San Diego, CA, USA: SPIE, 2004, S. 68–77.
- [Spe+78] W. J. SPENCER, W. T. CORBETT, L. R. DOMINGUEZ und B. D. SHAFER. „An Electronically Controlled Piezoelectric Insulin Pump and Valves“. In: *Sonics and Ultrasonics, IEEE Transactions on* 25.3 (1978), S. 153–156.
- [SS85] L. SRIVASTAVA und V. SRIVASTAVA. „Peristaltic transport of a non-newtonian fluid: Applications to the vas deferens and small intestine“. In: *Annals of Biomedical Engineering* 13.2 (1985), S. 137–153.
-

- [SKG08] H. STOYANOV, G. KOFOD und R. GERHARD. „A co-axial dielectric elastomer actuator“. In: *Advances in Science and Technology*. Hrsg. von P. VINCENZINI, Y. BARCOHEN und F. CARPI. Bd. 61. Trans Tech Publications LTD, 2008, S. 81–84.
- [Su+98] J. SU, Q. ZHANG, P.-C. WANG, A. G. MACDIARMID und K. J. WYNNE. „Preparation and characterization of electrostrictive polyurethane films with conductive polymer electrodes“. In: *Polymers for Advanced Technologies* 9.6 (1998), S. 317–321.
- [Sza+03] J. P. SZABO, J. A. HILTZ, C. G. CAMERON, R. S. UNDERHILL, J. MASSEY, B. WHITE und J. LEIDNER. „Elastomeric composites with high dielectric constant for use in Maxwell stress actuators“. In: *Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 5051. San Diego, CA, USA: SPIE, 2003, S. 180–190.
- [TAS05] M. M. TEYMOORI und E. ABBASPOUR-SANI. „Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications“. In: *Sensors and Actuators A* 17.2 (2005), S. 222–229.
- [TB75] L. THOMAS und S. BESSMAN. „Prototype for an implantable micropump powered by piezoelectric disk benders“. In: *Transactions American Society for Artificial Internal Organs* 21 (1975), S. 516–522.
- [TB84] P. TORVIK und R. BAGLEY. „On the appearance of the fractional derivative in the behavior of real materials“. In: *Journal of Applied Mechanics - Transactions of the ASME* 51.2 (1984), S. 294–298.
- [Tou56] R. TOUPIN. „The Elastic Dielectric“. In: *Indiana Univ. Math. J. fJO - Indiana University Mathematics Journal* 5.6 (1956), S. 849–915.
- [TTYSFS07] Y.-C. TUNG, N. TORISAWA YU-SUKE FUTAI und T. SHUICHI. „Small volume low mechanical stress cytometry using computer-controlled Braille display microfluidics“. In: *Lab on a Chip* 7.11 (2007), S. 1497–1503.
- [UM05] R. S. UNDERHILL und B. W. MICHALCHUK. „Carbon nanotube-elastomer composites for use in dielectric polymer actuators“. In: *International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, 2005. Proceedings.* (2005), S. 369–370.
- [Vol05] M. W. VOLK. *Pump Characteristics and Applications*. 2. Bd. 103. Mechanical Engineering. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.
- [Wac] WACKER CHEMIE AG. *Elastosil P 7670 A/B. Datenblatt*.
- [Wag14] K. W. WAGNER. „Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen“. In: *Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)* 2.9 (1914), S. 371–387.
- [Wan+94] H. WANG, Q. M. ZHANG, L. E. CROSS und ET AL. „The origins of electromechanical response in polyurethane elastomers.“ In: *Proc. Int. Symp. Applications of Ferroelectrics*. (1994), S. 182–185.
- [WD05] L. WANG und Z.-M. DANG. „Carbon nanotube composites with high dielectric constant at low percolation threshold“. In: *Applied Physics Letters* 87.4 (2005), S. 042903–3.
- [Wei08] T. WEILAND. *Private Kommunikation*. 2008.
- [WR07] W. WEYH und D. RÖTHLEIN. „Infusionstechnik“. In: *Medizintechnik. Verfahren – Systeme – Informationsverarbeitung*. Hrsg. von R. KRAMME. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 557–568.

-
- [WLD06] A. WINGERT, M. D. LICHTER und S. DUBOWSKY. „On the design of large degree-of-freedom digital mechatronic devices based on bistable dielectric elastomer actuators“. In: *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 11.4 (2006), S. 448–456.
- [WM07] M. WISSLER und E. MAZZA. „Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 138.2 (2007), S. 384–393.
- [Woi05] P. WOIAS. „Micropump - past, progress and future prospects“. In: *Sensors and Actuators B: Chemical* 105.1 (2005), S. 28–38.
- [Won+01] Y.-W. WONG, C.-X. LIU, L.-S. TAI und F. G. SHIN. „Electrostriction of composites of polyurethane (PU) with ferroelectric lead zirconate titanate (PZT) ceramic particles“. In: Bd. 4329. 2001, S. 516–521.
- [XN+07] J. XAVIER-NETO, R. A. CASTRO, A. C. SAMPAIO, A. P. AZAMBUJA, H. A. CASTILLO, R. M. CRAVO und M. S. SIMOES-COSTA. „Parallel avenues in the evolution of hearts and pumping organs“. In: *Cellular and Molecular Life Sciences* 64.6 (2007), S. 719–734.
- [YRS05] D.-Q. YANG, J.-F. ROCHETTE und E. SACHER. „Functionalization of Multiwalled Carbon Nanotubes by Mild Aqueous Sonication“. In: *Journal of Physical Chemistry B* 109.16 (2005), S. 7788–7794.
- [Yu+06] X. YU, R. RAJAMANI, K. A. STELSON und T. CUI. „Carbon nanotube-based transparent thin film acoustic actuators and sensors“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 132.2 (2006), S. 626–631.
- [Yua+08a] W. YUAN, L. HU, Z. B. YU, T. LAM, J. BIGGS u. a. „Fault-Tolerant Dielectric Elastomer Actuators using Single-Walled Carbon Nanotube Electrodes“. In: *Advanced Materials* 20.3 (2008), S. 621–625.
- [Yua+08b] W. YUAN, L. HU, S. M. HA, T. LAM, G. GRUNER und Q. PEI. „Self-clearable carbon nanotube electrodes for improved performance of dielectric elastomer actuators“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN. Bd. 6927. San Diego, California, USA: SPIE, 2008, 69270P–12.
- [Yua+09] W. YUAN, P. BROCHU, H. ZHANG, A. JAN und Q. PEI. „Long lifetime dielectric elastomer actuators under continuous high strain actuation“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, 72870O–8.
- [Zhe+94] M. A. ZHENYI, J. I. SCHEINBEIM, L. J. W. und B. A. NEWMAN. „High Field Electrostrictive Response of Polymers“. In: *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics* 32 (1994), S. 2721–2731.

Eigene Veröffentlichungen

- [Fli+09] K. FLITTNER, P. LOTZ, M. MATYSEK, M. SCHLOSSER und H. F. SCHLAACK. „Integrated gas valve array using dielectric elastomer actuators“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, S. 72872C –7.
- [LMS09] P. LOTZ, M. MATYSEK und H. F. SCHLAACK. „Peristaltic pump made of dielectric elastomer actuators“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, S. 72872D –8.
- [Lot+06] P. LOTZ, V. BISCHOF, M. MATYSEK und H. F. SCHLAACK. „Integrated sensor-actuator-system based on dielectric polymer actuators for peristaltic pumps“. In: *Conference Proceedings: Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2006, Bremen*. Hrsg. von H. BORGMANN. 2006, S. 104–107.
- [Lot+08a] P. LOTZ, M. MATYSEK, P. LECHNER, M. HAMANN und H. F. SCHLAACK. „Dielectric elastomer actuators using improved thin film processing and nanosized particles“. In: *Smart Structures / NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) X. Proceedings of SPIE 6927 (2008)*.
- [Lot+08b] P. LOTZ, M. MATYSEK, K. FLITTNER und H. F. SCHLAACK. „Reduction of the Driving Voltage in Dielectric Elastomer Actuators“. In: *Conference proceedings: Actuator 2008, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 9-11 June 2008, Bremen, Germany*. 2008, S. 868–871.
- [MLS06] M. MATYSEK, P. LOTZ und H. F. SCHLAACK. „Braille Display with Dielectric Polymer Actuator“. In: *Conference Proceedings: Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 14 - 16 June 2006, Bremen*. Hrsg. von H. BORGMANN. 2006.
- [MLS08] M. MATYSEK, P. LOTZ und H. F. SCHLAACK. „Development of Multilayer Dielectric Elastomer Actuators“. In: *Annex of the Conference proceedings: Actuator 2008, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 9-11 June 2008, Bremen, Germany*. 2008.
- [MLS09] M. MATYSEK, P. LOTZ und H. F. SCHLAACK. „Tactile display with dielectric multilayer elastomer actuators“. In: *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009*. Hrsg. von Y. BAR-COHEN und T. WALLMERSPERGER. Bd. 7287. San Diego, CA, USA: SPIE, 2009, S. 72871D –9.
- [Mat+08a] M. MATYSEK, P. LOTZ, K. FLITTNER und H. F. SCHLAACK. „High-precision characterization of dielectric elastomer stack actuators and their material parameters“. In: *Smart Structures / NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) X. Proceedings of SPIE 6927 (2008)*.
- [Mat+08b] M. MATYSEK, P. LOTZ, K. FLITTNER und H. F. SCHLAACK. „New Electrode Materials and Technologies for Enhanced Performance of Stacked Dielectric Elastomer Actuators“. In: *Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems, 9-11 June 2008, Bremen, Germany*. 2008, S. 872–875.
- [Mat+09] M. MATYSEK, P. LOTZ, T. WINTERSTEIN und H. F. SCHLAACK. „Dielectric Elastomer Actuators for Tactile Displays“. In: *World Haptics. March 18-20, 2009. Salt Lake City, USA*. Salt Lake City 2009.

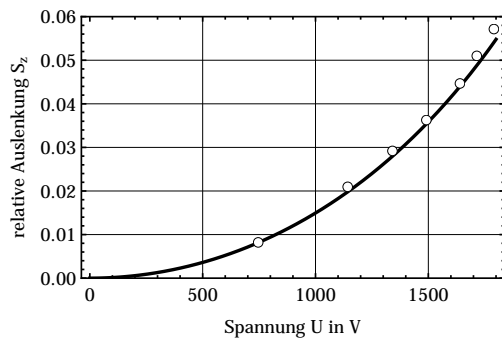
-
- [SLM08] H. F. SCHLAAK, P. LOTZ und M. MATYSEK. „Multilayer Stack Contractile Actuators“. In: *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers - Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. Hrsg. von F. CARPI, D. DE ROSSI, R. KORNBLUH, R. E. PELRINE und P. SOMMER-LARSEN. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [SML05] H. F. SCHLAAK, M. MATYSEK und P. LOTZ. „Novel multilayer electrostatic solid state actuators with elastic dielectric“. In: *SPIE Proceedings Smart Structures and Materials*. 5759 (2005).
- [WLW05] C. WOHLGEMUTH, P. LOTZ und R. WERTHSCHÜTZKY. „Fehlerkorrektur piezoresistiver Drucksensoren mit optimierter Kalibrierung des Signalwandlers“. In: *Technisches Messen - tm* 72.2 (2005), S. 83–92.

Betreute studentische Arbeiten

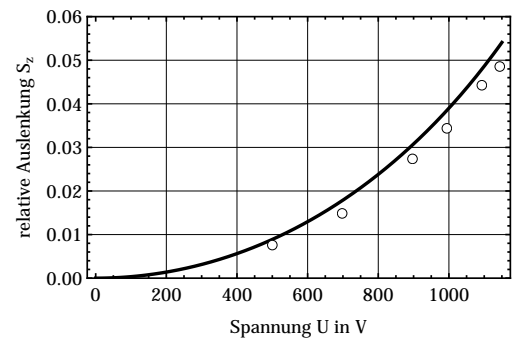
- [Bac+08] M. BACHMANN, M. MANDERSCHIED, S. MATICH, S. QUEDNAU, P. SCHUSTER und Y. WANG. „Entwicklung einer peristaltischen Pumpe.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2008.
- [Bal+07] J. M. BALLESTEROS, F. DASSINGER, J. DECKER, F. KOARK und H. MÖSSINGER. „Entwicklung eines elektromechanischen Weizenbier-Einschenkers.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Bau+07] B. BAUM, C. BÜTTGEN, M. DECHANT, Y. WANG und B. ZYDEK. „Entwicklung eines elektromechanischen Klötzchenstaplers.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Bog07] M. BOGDAHN. „Charakterisierung der Eigenschaften dünner dielektrischer Schichten“. Diplomarbeit 1627. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Boh+06] L. BOHNE, D. BÜSCHER, A. FROHNAPFEL und S. KRÜGER. „Mehrkanal-Signal-/Spannungsquelle für dielektrische Polymeraktoren.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2006.
- [Ebe+07] J. EBERHARDT, M. MANDERSCHIED, Y. WANG und N. WOLF. „Maschinenmodul zur Elektrodenherstellung aus leitfähigen Suspensionen.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Gro+05] A. GROH, M. HAMANN, C. HATZFELD, S. KRÜGER und M. NEUMANN. „Entwicklung eines elektromechanischen Tauziehers.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2005.
- [Ham09] M. HAMANN. „Evaluierung und Charakterisierung leitfähiger Materialien für Elektroden von dielektrischen Elastomeraktoren“. Diplomarbeit 1691. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2009.
- [Hei+05] P. HEINICKEL, J. KNÖCK, T. ROSSNER und A. SCHLENSAG. „Herstellung elastischer Elektroden.“ Projektseminar. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2005.
- [Lüc07] K. LÜCKEL. „Prüfstand zur Messung von Motorinduktivitäten für Linearmotoren“. Diplomarbeit 1645. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Lec07] P. LECHNER. „Optimierung von Elastomeren mit Hilfe von Nanopartikeln für die Anwendung in dielektrischen Polymeraktoren“. Diplomarbeit 1653. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Ros07] T. ROSSNER. „Untersuchung der sensorischen Eigenschaften gestapelter dielektrischer Elastomeraktoren“. Studienarbeit 1656. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2007.
- [Sch06] A. SCHLENSAG. „FEM-Simulation von elektrostatischen Aktoren mit elastischem Dielektrikum“. Studienarbeit 1609. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Institut für Elektromechanische Konstruktionen, 2006.

A Statische Auslenkungen

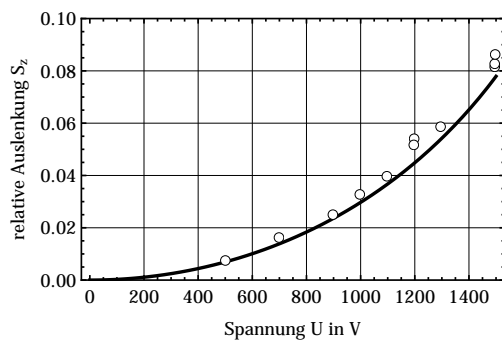
Die folgenden Diagramme zeigen weitere Messergebnisse zur statischen Auslenkung dielektrischer Elastomerstapelaktoren und den Vergleich mit dem Modell aus Abschnitt 5.2.1.



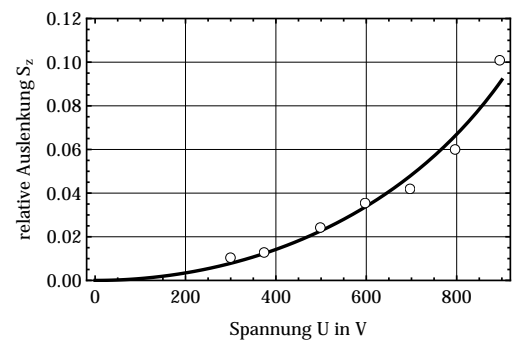
(a) P87-5



(b) P85-5



(c) P77-5



(d) M83

Abbildung A.1: Vergleich der gemessenen relativen Auslenkung und der Vorhersage aus der Modellgleichung (5.8).

Tabelle A.1: Parameter der Aktoren aus Abbildung A.1

		P87-5	P85-5	P77-5	M83
Aktorschichten n	1	25	38	30	30
Dicke Einzelschicht z_0	μm	60	40	50	30
Gesamtdicke d_0	μm	2091	2071	2081	960
aktive Dicke d_a	μm	840	1185	1035	510



B Mathematische Ergänzungen

B.1 Kettenleitermatrizen eines Elektrodenpaars

Ein Elektrodenpaar des dielektrischen Aktors stellt sich als ein verteiltes System von Widerstands- und Kapazitätselementen dar, siehe Abbildung B.1. Um den Spannungsabfall am äußeren rechten Element zu berechnen, wird das Netzwerk in mehrere Teile unterteilt.

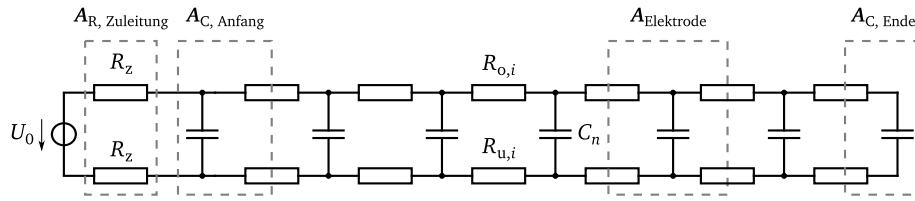


Abbildung B.1: Ersatzschaltbild der verteilten Widerstands- und Kapazitätselemente eines Elektrodenpaars im dielektrischen Elastomeraktor.

Die Zuleitungswiderstände R_z werden durch die Matrix $A_{R, \text{Zuleitung}}$ dargestellt:

$$A_{R, \text{Zuleitung}} = \begin{pmatrix} 1 & 2R_z \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Die Randlelemente $A_{C, \text{Anfang}}$ und $A_{C, \text{Ende}}$ sind grundsätzlich gleich, sie umfassen jeweils ein Kapazitätselement sowie zwei Widerstandselemente.

$$\begin{aligned} A_{C, \text{Anfang}} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_n & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & R_n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad R_n = \frac{1}{2} (R_{o,i} + R_{u,i}) = \frac{R_{\text{Elektrode}}}{n-1} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & R_n \\ j\omega C_n & 1 + j\omega R_n C_n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Entsprechendes gilt für das Randlelement am Ende der Elektrode. Der Unterschied besteht lediglich in der Reihenfolge der Matrizenmultiplikation:

$$\begin{aligned} A_{C, \text{Ende}} &= \begin{pmatrix} 1 & R_n \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_n & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 + j\omega R_n C_n & R_n \\ j\omega C_n & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

Für die Berechnung der Randlelemente sowie der innenliegenden Elektrodenelemente werden die Widerstandselemente $R_{o,i}$ und $R_{u,i}$ aufgeteilt und jeweils zur Hälfte einem Element zugeteilt, siehe Abbildung B.1 und Abbildung B.2.

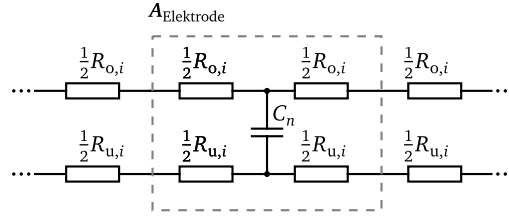


Abbildung B.2: Aufteilung der Widerstandselemente zu einem T-Glied.

Durch diese Aufteilung stellen sich die innenliegenden Elemente wie in Abbildung B.2 gezeigt als T-Glieder dar. Somit ergibt sich für diese Elemente die Matrix $A_{\text{Elektrode}}$ wie folgt:

$$A_{\text{Elektrode}} = j\omega C_n \begin{pmatrix} R_n + \frac{1}{j\omega C_n} & R_n \cdot \left(R_n + \frac{2}{j\omega C_n}\right) \\ 1 & R_n + \frac{1}{j\omega C_n} \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

B.2 Berechnung des Kapazitätsbelags

Folgende Umformungen führen von Gleichung (3.55) auf Gleichung (3.56) [Wei08]:

$$\begin{aligned} a \sum_{-\infty}^{\infty} \ln \sqrt{\frac{(ia)^2 + d^2}{(ia)^2 + r^2}} &= \\ &= \frac{a}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} \ln \left(\frac{(ia)^2 + d^2}{(ia)^2 + r^2} \right) \\ &= \frac{a}{2} \left[-\ln \left(\frac{d^2}{r^2} \right) + 2 \ln \left(\frac{d \operatorname{cosech} \left(\frac{\pi r}{a} \right) \sinh \left(\frac{\pi d}{a} \right)}{r} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

Mit Hilfe der Operation $\ln e^{\dots}$ kann dies leicht auf folgende Form gebracht werden:

$$= \frac{a}{2} \ln \left(\operatorname{cosech} \left(\frac{\pi r}{a} \right) \sinh \left(\frac{\pi d}{a} \right) \right) \quad (\text{B.6})$$

und mit $\operatorname{cosech}(x) = \frac{1}{\sinh(x)}$ folgt schließlich:

$$= \frac{a}{2} \ln \frac{\sinh \left(\pi \frac{d}{a} \right)}{\sinh \left(\pi \frac{r}{a} \right)} \quad (\text{B.7})$$

B.3 Beurteilung der Widerstandshysterese von Elektroden

Abbildung B.3 zeigt den typischen Widerstandsverlauf einer Elektrode, wenn diese planar gedehnt wird. Zur Beurteilung der Hysterese wird ein Polynom mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Messwerte angepasst.

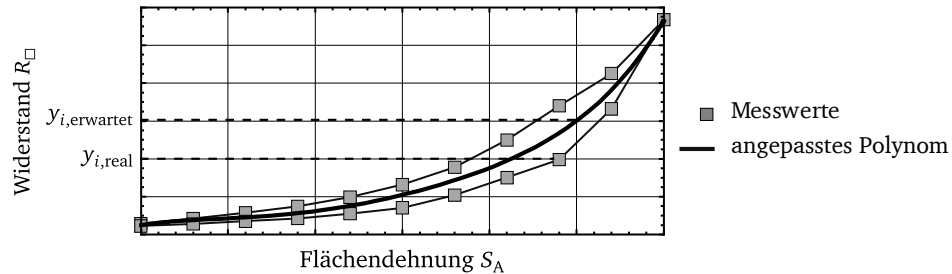


Abbildung B.3: Dehnungsverlauf des Widerstandes einer Graphitelektrode und angepasste quadratische Kennlinie zur Beurteilung der Hysterese.

Zur Beurteilung der Hysterese wird das Bestimmtheitsmaß r benutzt:

$$r = \frac{s_{\text{gesamt}} - s_{\text{res}}}{s_{\text{gesamt}}} \quad (\text{B.8})$$

Dieses bestimmt sich aus der Summe der Abweichungsquadrate s_{gesamt} und der Residual-Quadratsumme s_{res} . Die Summe der Abweichungsquadrate ergibt sich aus der quadrierten Differenz der Messwerte y_i und deren Mittelwert \bar{y} :

$$s_{\text{gesamt}} = \sum_i^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{B.9})$$

Die Residual-Quadratsumme s_{res} beschreibt die quadrierte Differenz zwischen den berechneten Werten y_{erwartet} und den Messwerten y_{real} :

$$s_{\text{res}} = \sum_i^N (y_{\text{erwartet}} - y_{\text{real}})^2 \quad (\text{B.10})$$

Je kleiner die Hysterese der Messwerte ist, desto geringer ist die Abweichung zwischen dem absteigenden und dem aufsteigenden Ast der Messwertkurve. Dementsprechend verschwindet die Residual-Quadratsumme s_{res} und das Bestimmtheitsmaß r strebt gegen 1.



Lebenslauf

Peter Lotz

geboren am 6. Juli 1977 in Mainz
verheiratet

Schulbildung

1984 – 1988	Grundschule Bischofsheim
1988 – 1997	Bischöfliches Willigis Gymnasium, Mainz
Juni 1997	Abitur

Zivildienst

September 1997 – Oktober 1998	Zivildienst als Pflegekraft St. Vincenz- und Elisabeth-Krankenhaus, Mainz
-------------------------------	--

Studium

Oktober 1998 – Mai 2004	Elektro- und Informationstechnik TU Darmstadt Fachrichtung: Mikro- und Feinwerktechnik
-------------------------	--

Berufliche Tätigkeit

seit Juli 2004	Wissenschaftlicher Mitarbeiter TU Darmstadt Institut für Elektromechanische Konstruktionen FG Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme
----------------	--

Praktika

1998 / 1999	Adam Opel AG, Rüsselsheim
2002	Siemens VDO AG, Babenhausen
